

N° D'ORDRE :

1131.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. CHARLES NORDMANN,

Astronome à l'Observatoire de Nice.

1^{re} THÈSE. — ESSAI SUR LE RÔLE DES ONDES HERTZIENNES EN ASTRONOMIE PHYSIQUE
ET SUR DIVERSES QUESTIONS QUI S'Y RATTACHENT.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 19^e Juin 1903 devant la Commission d'Examen.

MM. POINCARÉ, *Président.*

PELLAT,

MOISSAN,

} *Examineurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1903

N° D'ORDRE :

1151.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. CHARLES NORDMANN,

Astronome à l'Observatoire de Nice.

1^{re} THÈSE. — ESSAI SUR LE RÔLE DES ONDES HERTZIENNES EN ASTRONOMIE PHYSIQUE
ET SUR DIVERSES QUESTIONS QUI S'Y RATTACHENT.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 13 Juin 1903 devant la Commission d'Examen.



MM. POINCARÉ, *Président.*

PELLAT, }
MOISSAN, } *Examineurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1903

ACADÉMIE DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

	MM.	
DOYEN	PAUL APPELL.....	Mécanique rationnelle.
DOYEN HONORAIRE	GASTON DARBOUX.....	Géométrie supérieure.
PROFESSEUR HONORAIRE	L. TROOST.	
	LIPPMANN.....	Physique.
	BOUTY.....	Physique.
	DUCLAUX.....	Chimie biologique.
	BOUSSINESQ.....	Calcul des probabilités et Physique mathématique.
	PICARD.....	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
	H. POINCARÉ.....	Astronomie mathématique et Mécanique céleste.
	YVES DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie comparée.
	GASTON BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	DITTE.....	Chimie.
	MUNIER-CHALMAS.....	Géologie.
PROFESSEURS	GIARD.....	Zoologie, Evolution des êtres organisés.
	WOLF.....	Astronomie physique.
	KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	VÉLAIN.....	Géographie physique.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	CHATIN.....	Histologie.
	PELLAT.....	Physique.
	HALLER.....	Chimie organique.
	H. MOISSAN.....	Chimie.
	JOANNIS.....	Chimie (Ens ^{nt} P. C. N.).
	P. JANET.....	Physique (Ens ^{nt} P. C. N.).
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	N.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie comparée.
	PUISEUX.....	Mécanique et Astronomie.
	RIBAN.....	Chimie analytique.
	RAFFY.....	Éléments d'Analyse et de Mécanique.
PROFESSEURS ADJOINTS	LEDUC.....	Physique.
	HAUG.....	Géologie.
	HADAMARD.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	ANDOYER.....	Astronomie mathématique et Mécanique céleste.
SECRÉTAIRE	A. GUILLET.	

A MES PARENTS.

Hommage de ma piété filiale.

A MON MAÎTRE VÉNÉRÉ

MONSIEUR H. POINCARÉ,

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ET DU BUREAU DES LONGITUDES.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552423_0012

PREMIÈRE THÈSE.

ESSAI SUR LE RÔLE DES ONDES HERTZIENNES

EN ASTRONOMIE PHYSIQUE

ET

SUR DIVERSES QUESTIONS QUI S'Y RATTACHENT.

« Omnis enim Philosophiæ difficultas in eo versari videtur, ut a Phænomenis investigemus vires Naturæ, deinde ab his viribus demonstremus Phænomena reliqua »

I. NEWTON. (*Philosophiæ naturalis Principia.*)

INTRODUCTION.

I. — Par la découverte de l'analyse spectrale, l'Astronomie, qui jusqu'au milieu du siècle dernier s'était presque exclusivement cantonnée dans l'étude des mouvements des corps célestes, est entrée dans une voie nouvelle et féconde; l'Astronomie physique a été créée. Depuis quelques années, et grâce aux découvertes récentes de la Physique expérimentale, spécialement en Électricité, il semble que le domaine de l'Astronomie physique elle-même s'est élargi d'une manière imprévue.

En même temps que les physiciens trouvaient que les phénomènes optiques ne sont que des cas particuliers des phénomènes électriques, les astronomes étaient amenés irrésistiblement à ne plus considérer les phénomènes spectraux des atmosphères raréfiées des astres et de la Terre que comme les manifestations visibles des forces électriques qui y règnent. Depuis longtemps la relation mystérieuse qui relie les variations de l'activité solaire à la production des phénomènes de l'Aurore boréale et du Magnétisme terrestre avait convaincu les astronomes que d'autres forces que la gravitation se transmettent dans l'espace interplanétaire. Grâce aux progrès réalisés dans l'étude des gaz raréfiés et à une connaissance plus exacte des formes d'énergies qui s'y manifestent, on a pu

essayer de se faire une idée de la nature probable de ces forces inconnues, et des circonstances qui dans les immenses étendues de gaz raréfiés des atmosphères astrales peuvent leur donner naissance.

Nous avons voulu, dans ce travail, apporter une modeste contribution à la connaissance de ces questions. Nous nous sommes attaché surtout à l'étude des phénomènes qui sont sous la dépendance des variations de l'activité solaire, tant sur le Soleil lui-même que sur notre globe. Les matériaux d'observation relatifs à tous ces phénomènes sont devenus depuis quelques années très nombreux et très complets grâce au perfectionnement des méthodes spectroscopiques et à l'observation suivie des éclipses, en ce qui concerne l'atmosphère du Soleil, grâce à l'enregistrement généralisé des variations magnétiques, et à la multiplicité des expéditions polaires en ce qui concerne les Aurores boréales et les variations du Magnétisme terrestre. Mais, suivant la forte expression de M. Poincaré : « On fait la Science avec des faits comme une maison avec des pierres; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison. » Nous nous sommes efforcé dans ce travail de dégager de l'ensemble des faits eux-mêmes, et de chacun d'eux en particulier, l'essence des causes naturelles; ce sont les faits qui nous ont conduit à la notion d'un rayonnement électromagnétique du Soleil, et il apparaîtra peut-être, dans le cours de ce travail, que cette notion est de nature à jeter quelque lumière sur plusieurs des phénomènes les plus mystérieux de la Physique du globe et de la Physique céleste, et à les coordonner en une synthèse simple par la seule généralisation des données récentes de la Physique expérimentale.

II. — Le Chapitre I de ce Mémoire est consacré à l'exposé des expériences que nous avons pu, grâce à la haute bienveillance de M. Janssen, exécuter sur le Mont-Blanc dans le but de rechercher les radiations électromagnétiques du Soleil; il est consacré également à l'étude des circonstances, déduites de l'observation, qui, sur le Soleil, doivent engendrer de telles radiations et faire varier leur intensité suivant les phases de l'activité solaire.

Le Chapitre II, complément nécessaire du précédent, traite des variations que, parallèlement aux phases de la période des taches, subit le rayonnement proprement dit du Soleil, et concurremment, la température moyenne annuelle de la Terre. Nous ne saurions trop remercier M. Angot pour les conseils éclairés qu'il ne nous a pas ménagés dans cette partie de notre travail, et qui nous ont été infiniment précieux.

Le Chapitre III traite de la Couronne solaire, considérée en particulier dans ses relations avec la période des taches.

Le Chapitre IV traite des diverses variations et perturbations du Magnétisme

terrestre qui sont sous la dépendance de l'activité solaire, et de l'effet des éclipses de Soleil sur la position de l'aiguille aimantée.

Le Chapitre V traite des Aurores boréales et leurs relations avec le Soleil.

Le Chapitre VI et le Chapitre VII, qui constituent une application des notions précédemment acquises aux phénomènes qui se passent en dehors du système solaire, se rapportent, l'un d'une manière générale aux nébuleuses, l'autre aux phénomènes particuliers observés au voisinage de la nouvelle Étoile de Persée.

La partie bibliographique et historique des questions étudiées a été traitée séparément dans chaque Chapitre.

Qu'il nous soit permis d'exprimer à M. H. Poincaré notre profonde gratitude pour ses conseils si bienveillants, et pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la dédicace de cette Thèse, modeste hommage de reconnaissance et de respectueuse admiration.



CHAPITRE I.

SUR LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE DU SOLEIL.

I. — On sait que la photosphère du Soleil nous envoie des radiations lumineuses, qui agissent sur la rétine, et d'autres obscures (ultra-violettes ou infra-rouges). Les premières ne doivent les qualités qui nous les font paraître de nature différente qu'à « une sorte de hasard physiologique », suivant l'expression de M. Poincaré, qui a dit aussi quelque part :

« Pour le physicien, l'infra-rouge ne diffère pas plus du rouge que le rouge du vert, la longueur d'onde est seulement plus grande : celle des radiations hertziennes est beaucoup plus grande encore, mais il n'y a là que des différences de degré. ».

Et il semble à peu près hors de doute actuellement, en effet, que les idées de Maxwell, d'après lesquelles la lumière est un phénomène électromagnétique, sont vraies. Elles ont reçu une première et éclatante confirmation le jour où Hertz démontra la nature ondulatoire des phénomènes produits dans le milieu électrique par une décharge, au moyen de l'expérience classique des interférences entre les ondes électriques directes et les ondes réfléchies normalement par une paroi métallique. Hertz réalisa également la réfraction de ces ondes et montra leur état de polarisation.

Ces premiers résultats avaient une importance philosophique capitale, en ce qu'ils confirmaient l'analogie ou, peut-être mieux, l'identité de nature, déjà soupçonnée, de ces phénomènes avec les phénomènes lumineux. Les nombreuses recherches exécutées depuis, pour voir si l'accord entre les deux ordres de phénomènes se poursuivait, ont élargi ce champ d'étude. On a trouvé que, conformément aux idées de Maxwell, les ondulations électriques se propagent avec la vitesse de la lumière ; on a pu reproduire avec ces ondes la plupart des phénomènes de l'Optique : les interférences, les phénomènes des lames minces et la diffraction, la polarisation par réflexion, la réfraction simple et double, la réflexion totale ; les quelques insuccès qu'on a rencontrés peuvent être attribués à l'influence des phénomènes de diffraction, qui sont prépondérants dans le cas de grandes longueurs d'onde.

Enfin M. Rubens, par sa découverte des *rayons restants*, a montré qu'une source lumineuse quelconque, telle qu'un bec à incandescence, émet d'une manière continue des rayons de très grande longueur d'onde qui, dans le spectre, et si l'on adopte l'échelle logarithmique, se placent plus près des ondes électriques les plus courtes que de la limite du spectre visible. D'autre part, M. Rubens a montré que ces ondes sont de nature nettement électromagnétiques et que leurs propriétés les rapprochent beaucoup plus des ondes hertziennes que des ondes lumineuses.

Il semble donc que la justesse des idées de Maxwell est bien démontrée aujourd'hui : la généralité des physiciens pensent actuellement que la lumière est un phénomène électromagnétique et les plus modernes théories de l'émission (celle de Planck et celle d'Ebert, par exemple) ont à leur base cette hypothèse. L'Astronomie n'aurait-elle donc pas le droit de s'emparer d'une idée qui a été si fertile en Physique ?

Il apparaît donc qu'il n'y a pas de base philosophique pour une distinction physique entre un rayonnement visible et un rayonnement hertzien émanés du Soleil. Et l'on peut, *a priori*, considérer comme une hypothèse extrêmement vraisemblable que la photosphère émet des ondes hertziennes.

Mais il est d'autres considérations, toutes différentes, non plus empruntées celles-ci aux analogies théoriques ou expérimentales de la Physique, mais tirées immédiatement de l'examen même des phénomènes solaires et qui, *irrésistiblement*, nous conduisent à penser que le Soleil est un gigantesque radiateur d'ondulations électriques, et que celles-ci *doivent* s'y produire dans des circonstances identiques à celles où nous les voyons s'engendrer dans nos laboratoires et dans notre atmosphère :

Chaque fois que, dans notre atmosphère, des perturbations mécaniques violentes se produisent (cyclones, dépressions brusques, éruptions volcaniques), des décharges électriques intenses se produisent, qui tendent à rétablir l'équilibre rompu des couches de niveau et à égaliser les potentiels. Or, les photographies du Soleil, celles notamment que M. Janssen obtient à Meudon, montrent que la surface en est constituée par des nuages photosphériques ou *grains de riz*, dont chacun a une étendue fréquemment plus grande que la France et qui sont animés de mouvements si rapides que l'aspect des clichés n'est plus identiquement le même d'une minute à l'autre et que les cyclones terrestres les plus formidables n'ont que des vitesses infimes en comparaison. Comme la photosphère elle-même, la chromosphère et les protubérances, qui constituent la partie basse de l'atmosphère solaire, sont sujettes à de constantes et violentes éruptions. Et tous ces mouvements des gaz solaires doivent engendrer des décharges électriques, semblables à celles de nos orages, mais incomparablement plus intenses.

Ce n'est pas seulement l'étude oculaire et photographique du Soleil qui nous démontre qu'il doit être le siège de décharges électriques violentes; l'analyse spectrale a conduit depuis longtemps à la même conclusion : Dès 1873, MM. Tacchini et Delarive l'ont montré ⁽¹⁾; M. Fizeau, en 1891 ⁽²⁾, a appuyé ces idées de preuves nouvelles, que les recherches les plus récentes sur la luminescence des gaz, et notamment de l'hydrogène, n'ont fait que confirmer; enfin, M. Deslandres a déduit, de l'étude du spectre et des formes variées des protubérances éruptives, que celles-ci sont illuminées électriquement et sont produites par des décharges analogues à celles des orages terrestres ⁽³⁾.

Or, dans ces décharges intenses de l'atmosphère solaire, il doit se produire des ondes hertziennes, comme celles de nos orages atmosphériques (que MM. Popoff en Russie, Tommasina en Suisse, Fényi en Autriche, etc. enregistrent régulièrement, à l'aide d'antennes et de radioconducteurs), mais incomparablement plus intenses. On sait, d'autre part, que la fréquence et l'intensité des protubérances et l'agitation de la surface solaire sont intimement liées à la présence sur le Soleil de taches et de facules; l'intensité des décharges électriques dans le Soleil doit donc en dépendre elle-même directement.

De tous ces faits on est amené logiquement à déduire la proposition suivante :

Le Soleil doit émettre des ondes hertziennes, et cette émission doit être particulièrement intense dans les régions et aux époques de la plus grande activité solaire, c'est-à-dire dans la région des taches et des facules et au moment du maximum des taches solaires.

Avant d'aller plus loin, il ne nous paraît pas inutile de faire quelques remarques sur la nature de cette proposition. Certes, elle a jusqu'à un certain point le caractère d'une hypothèse. et il en sera ainsi jusqu'au jour où l'on aura pu enregistrer expérimentalement des radiations hertziennes d'origine nettement solaire. Mais, si des causes naturelles ont, comme c'était à prévoir (nous le verrons plus loin), condamné à l'insuccès les tentatives expérimentales faites jusqu'ici dans ce sens, la pensée n'a-t-elle pas le droit de devancer ici l'expérience encore impuissante?

Il semble que cette hypothèse s'impose au contraire à l'esprit, car elle réalise en toute rigueur les conditions que l'on peut exiger d'une hypothèse véritablement scientifique : 1° elle n'est, semble-t-il, en contradiction avec aucun fait connu; 2° elle explique simplement et coordonne, comme nous le verrons au cours de ce travail, des phénomènes restés pour la plupart fort obscurs jus-

(1) *Memorie della Societa degli Spettroscopisti italiani*, 1873.

(2) *Comptes rendus*, 1891, 2^e semestre, p. 353.

(3) *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V. C. *passim*.

qu'ici, malgré leur importance; et l'examen, non plus seulement superficiel et général, mais approfondi et détaillé des faits d'observation (pierre de touche de toute théorie), ne se trouve pas une seule fois, à notre connaissance, en désaccord avec les conséquences logiques de notre hypothèse; 3° elle synthétise en quelque sorte, en les rattachant à une cause unique et simple, ainsi que nous le verrons, des phénomènes *nombreux et différents*, et qui jusqu'ici constituaient autant de problèmes distincts et, pour la plupart, sans liens apparents; 4° enfin, cette proposition ne se justifie pas seulement *a posteriori* par les phénomènes qu'elle permet d'expliquer, mais nous venons de la démontrer *a priori* par d'autres considérations déduites elles-mêmes des faits d'observation et indépendantes des effets qu'on veut expliquer.

II. — En 1896, MM. Wilsing et Scheiner ont constaté, à Potsdam, qu'en faisant tomber les rayons solaires réfléchis par un héliostat sur un fil d'acier posé sur deux fils parallèles, la résistance de ce système ne variait pas. Cette expérience rudimentaire, qui constituait la première recherche expérimentale d'un rayonnement électromagnétique du Soleil, demandait à être reprise par une méthode plus précise et plus sensible. C'est ce que nous avons entrepris, au cours de la mission à l'observatoire du Mont-Blanc, que M. Janssen a bien voulu nous confier au mois de septembre 1901.

A priori, il était certain que si des ondes hertziennes émanaient du Soleil, elles devaient être très fortement absorbées par les couches supérieures raréfiées de notre atmosphère; on sait en effet, notamment par les expériences de M. J.-J. Thomson, que les gaz raréfiés ont la propriété d'absorber énergiquement les oscillations électriques et que leur opacité pour celles-ci est à peine inférieure à celle des métaux. La question qui se posait était donc celle-ci : *les ondes hertziennes hypothétiques émises par le Soleil sont-elles capables de vaincre l'action absorbante des couches supérieures de l'atmosphère au point d'être sensibles à nos appareils?*

Le choix d'une haute station était tout indiqué pour cette recherche, car il éliminait, dans la plus grande mesure possible, l'action absorbante de l'atmosphère, et surtout de la vapeur d'eau, sur les ondes qu'il s'agissait de déceler.

Nos expériences ont été exécutées à la station des Grands-Mulets, à 3100^m d'altitude. Le mauvais temps seul nous a empêché de les reprendre dans de bonnes conditions au sommet même du mont Blanc.

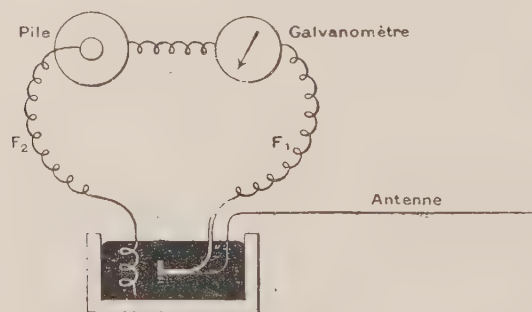
Le récepteur d'ondes était constitué par une antenne horizontale de 5^{mm} de diamètre et de 175^m de long que nous avons disposée sur le glacier des Bossons, sur des supports isolants en bois, de façon que vers midi les rayons solaires tombassent à peu près normalement sur elle. Nous avons placé cette antenne sur la partie du glacier qui est invisible de la vallée de Chamonix et cachée der-

rière la masse énorme du rocher des Grands-Mulets, de manière à la mettre à l'abri des perturbations pouvant provenir de la ligne électrique à haut voltage de Chamonix.

Le choix d'un glacier comme support de l'antenne était d'une très grande importance. Le glacier peut, en effet, être considéré comme un isolant à peu près parfait (ainsi qu'il résulte notamment des expériences télégraphiques exécutées ces dernières années au mont Blanc sous la direction de M. Janssen), et comme tel il est transparent aux ondes hertziennes; comme, d'autre part, l'épaisseur du glacier à l'endroit où était placée l'antenne, peut être (d'après la profondeur des crevasses qui s'y trouvent) estimée à au moins 25^m et que les rayons solaires étaient, au moment des expériences (équinoxe d'automne), très inclinés sur la verticale, il en résulte qu'une grave cause d'erreur possible, provenant d'une interférence entre les ondes solaires directes et les ondes réfléchies par le sol conducteur, était complètement éliminée.

L'indicateur d'ondes employé était un radioconducteur plongé et fixé au milieu d'un récipient contenant du mercure qui constituait une enceinte opaque pour les ondes hertziennes extérieures. L'un des pôles du radioconducteur était en contact avec le mercure; l'autre, au contraire, était isolé, et il en partait un fil F_1 , isolé également dans son trajet à travers le mercure et qui allait fermer le circuit où se trouvaient une pile Leclanché et un galvanomètre placés à l'extérieur

Fig. 1.



et réunis d'autre part avec le mercure de la cuve par un fil non isolé F_2 (*fig. 1*). Le fil F_1 était lui-même entouré d'une gaine conductrice qui formait écran électromagnétique, de sorte que le radioconducteur pouvait être considéré comme complètement à l'abri des ébranlements extérieurs. L'antenne, non isolée, allait rejoindre, à travers le mercure, l'un des pôles du radioconducteur et dans ces conditions ne pouvait propager aucune perturbation jusqu'à lui.

Nous avons employé pour ces expériences deux radioconducteurs réglables, construits par nous, et dont nous effectuions le réglage à l'intérieur même de l'enceinte en plongeant les doigts dans le mercure. L'un de ces radioconduc-

teurs était à limaille de nickel, et d'une sensibilité telle que la simple mise en marche d'une sonnerie ordinaire, munie de deux éléments Leclanché, suffisait, à plus de 4^m de distance, à faire dévier la tache lumineuse du galvanomètre de plus de 100 divisions sur l'échelle placée à 1^m. L'autre, également très sensible, et réglable, était constitué par 30 petites billes d'acier, disposées en contact dans un tube de cristal calibré de même diamètre qu'elles, et dont une vis spéciale permettait de serrer plus ou moins les contacts. Le galvanomètre employé était du type Desprez-d'Arsonval ordinaire.

Une fois l'appareil réglé à l'intérieur du mercure (et l'on conçoit que la grande longueur de l'antenne, 175^m, augmentait encore notablement la sensibilité du système), on faisait, à l'aide d'un robinet, écouler doucement le mercure de la cuve, de façon à mettre à nu le radioconducteur sur lequel l'antenne pouvait alors agir.

Dans ces conditions, les expériences répétées faites dans toute la journée du 19 septembre, par un très beau temps et un ciel sans nuage, successivement avec les deux radioconducteurs dont je vérifiais le réglage avant et après chaque expérience, nous ont toutes conduit au même résultat négatif, et nous n'avons pas pu enregistrer d'une façon certaine la moindre déviation de la tache lumineuse sur l'échelle divisée.

Il en résulte que les radiations hertziennes hypothétiques émises par le Soleil étaient complètement absorbées par les parties supérieures de notre atmosphère, dans les limites de sensibilité de nos appareils.

Nos expériences ont été faites en septembre 1900, c'est-à-dire d'une part à une époque où le Soleil a une distance zénithale déjà notablement plus grande qu'au solstice d'été, et, d'autre part, une année de minima des taches solaires (et il résulte des photographies prises à l'Observatoire de Meudon que précisément le jour de nos expériences il n'y avait pas le plus petit signe d'activité anormale, pas la plus petite tache sur le disque). Or, nous avons montré que l'intensité des ondes hertziennes solaires doit être notablement plus grande les années de maxima des taches. Il ne serait donc peut-être pas sans intérêt de reprendre ces expériences lors du maximum de 1904, si possible, aux environs du solstice d'été, et de nouveau dans une haute station.

Peut-être aurait-on dans ces conditions un résultat positif. L'expérience, en tous cas, semble digne d'être tentée.

CHAPITRE II.

SUR LA PÉRIODE DES TACHES SOLAIRES ET LES VARIATIONS DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES DE LA TERRE.

Nous avons établi dans le Chapitre précédent comment la période undécennale des taches solaires doit faire varier le rayonnement électromagnétique du Soleil. Avant d'aborder l'étude des divers phénomènes qui sont sous la dépendance de cette période des taches, il semble indispensable de savoir si cette période a également une influence sur le rayonnement calorifique du Soleil, et quelle est cette influence qui doit se manifester, si elle existe, par des variations des températures moyennes annuelles de la Terre.

Depuis l'apparition en 1873 ⁽¹⁾ du Mémoire bien connu de Köppen qui embrasse la période de 1820 à 1870, il n'a pas été publié de travail d'ensemble sur ce sujet. Nous avons entrepris, comme contribution à l'étude de cette importante question, de la reprendre à l'aide des données de ces trente dernières années; il nous a paru désirable qu'une lumière définitive fût, si possible, apportée sur ce point dont dépend la théorie d'une foule de problèmes importants, tant de la Physique du globe que de la Physique céleste. Précisément une théorie récente, présentée par M. Arrhénius pour expliquer les Aurores boréales et divers autres phénomènes, est basée sur une hypothèse exactement contraire au résultat de Köppen.

Or, si l'on se reporte au travail actinométrique publié par M. Savélieff ⁽²⁾, et qui est l'unique travail expérimental sur lequel M. Arrhénius croit pouvoir appuyer cette hypothèse, on trouve que : 1° ces observations actinographiques de Savélieff sont restées isolées et ont été faites en une seule station (Kiew) et seulement pendant 18 mois d'observations répartis d'ailleurs sur trois années (1890, 1891, 1892); qu'il semble difficile, dans ces conditions, de pouvoir attribuer sûrement à une cause cosmique des variations qui ont été observées en une seule station et pendant un temps aussi court et bien inférieur à la durée d'une seule période des taches solaires; que cette unique station, d'ailleurs,

⁽¹⁾ KÖPPEN, *Zeitschrift der Oesterreich. Gesellschaft für Meteorologie*, t. VIII, 1873, p. 241 et 257.

⁽²⁾ SAVÉLIEFF, *Comptes rendus*, t. CXVIII, p. 62.

est précisément située en dehors des régions du globe où les variations accidentelles et locales des températures ne dépassent pas de beaucoup les faibles variations d'origine solaire qu'il s'agit de déceler (*voir ci-dessous*); 2° parmi les deux séries, de trois nombres chacune, résumant ces observations de Savélieff, la première tendrait en effet à appuyer l'hypothèse de M. Arrhénius; or, la seconde conduit à la conclusion exactement contraire; 3° Savélieff lui-même dit expressément dans son Mémoire (1), et telle est aussi notre opinion : « La constante solaire ne pouvant être calculée que par extrapolation, sa valeur est, dans une certaine mesure, sujette à discussion; *aussi serait-il prématuré d'affirmer que la constante solaire augmente avec l'accroissement de l'activité de la surface solaire caractérisée par la fréquence des taches.* » Il ne semble donc pas que l'on puisse considérer ce travail de Savélieff comme de nature à infirmer sérieusement les conclusions auxquelles était arrivé Köppen.

Il résultait du travail de Köppen que la courbe de variation des températures moyennes annuelles n'affecte une allure régulière que dans les stations tropicales, et que, pour les régions extérieures aux tropiques, cette courbe devient complètement irrégulière, de sorte qu'il est impossible d'y reconnaître une allure périodique quelconque (2).

Nous n'avons donc utilisé dans cette étude que les données des stations tropicales. Mais, comme c'est surtout dans ces 30 dernières années que les observations météorologiques se sont partout répandues et systématisées, nous avons pu utiliser des matériaux beaucoup plus étendus et plus sûrs que ceux dont disposait Köppen : en effet, d'une part, tandis que Köppen ne possédait que des observations des Indes, des Antilles et de l'Amérique tropicale, nous avons pu employer celles d'un plus grand nombre de stations, réparties sur tout le tour du globe, de sorte que le résultat obtenu peut réellement être considéré comme représentant l'état moyen de toute la portion de la Terre comprise entre les Tropiques; d'autre part, nous avons eu à notre disposition des séries d'observations plus longues en général, pour chaque station, que celles que possédait Köppen, et tandis que celui-ci avait été obligé d'utiliser certaines séries ne comprenant que 6 ans d'observations (ce qui pouvait être la source de diverses erreurs), nous avons pu éliminer, grâce à la quantité plus grande de nos matériaux, toutes les séries qui ne comprenaient pas au moins 11 années d'observations, c'est-à-dire la valeur moyenne d'une période complète des taches solaires, ou encore le tiers de la période (1870 à 1900) que nous avons étudiée.

(1) *Loc. cit.*, p. 62.

(2) On pouvait, en quelque sorte, prévoir ce résultat, car les régions tropicales sont caractérisées par un climat très régulier, tandis que lorsqu'on se rapproche des pôles et dès qu'on a dépassé les tropiques, les variations accidentelles de la température deviennent très importantes et ont une amplitude énormément plus grande que la faible variation périodique qu'il s'agit de déceler ici.

Voici la liste des stations dont nous avons utilisé les observations (1) :

Maurice (1881 à 1900);
 Iles Rodrigues (1884 à 1899);
 Bombay (1875 à 1899);
 Batavia (1869 à 1898);
 Zi-Ka-Weï (1874 à 1899);
 Hong-Kong (1883 à 1898);
 Manille (1880 à 1900);
 La Havane (1870 à 1899; de 1879 à 1885, il y a lacune, les observations de ces années n'ayant pas été publiées);
 Jamaïque (1875 à 1899; dans cette série, les observations de 4 années isolées manquent, n'ayant pas été publiées);
 Trinité (1888 à 1900; les observations de 1891 manquent);
 Port-au-Prince (1887 à 1898);
 Récife de Pernambuco (1875 à 1897);
 Sierra-Leone (1874 à 1886).

Dans cette liste, les stations sont rangées par ordre de longitudes Est croissantes (à partir de Paris). Les observations indiquées comme manquantes n'ont pas été publiées.

Le Tableau suivant synthétise les résultats obtenus; la colonne A contient, pour chaque année, la moyenne générale des déviations par rapport à la normale de la température de toutes les stations; on a calculé cette série de moyennes en donnant le coefficient 2 aux observations de Bombay, Batavia, Zi-Ka-Weï, Hong-Kong, Manille, dont les données résultent d'un bien plus grand nombre d'observations journalières et s'étendent en général sur un plus grand nombre d'années que pour les autres stations; on a donné à celles-ci le coefficient 1. Les nombres de la colonne B (employés comme ordonnées dans la courbe ci-annexée) sont calculés de la façon suivante: chaque nombre de cette colonne est égal à la moyenne du nombre correspondant de A et de la demi-somme du nombre qui précède celui-ci et de celui qui le suit. Les nombres de la série B ont été ainsi calculés pour donner une allure plus homogène à la courbe de variation et éliminer autant que possible les irrégularités secondaires de cette courbe. Enfin, la colonne « Taches solaires » contient en regard pour chaque année les nombres relatifs des taches (nombres de Wolf); ils sont extraits d'un article de Wolfer récemment paru (voir *Meteorologische Zeitschrift*, mai 1902). Les nombres des colonnes A et B expriment des centièmes de degré centigrade.

(1) On trouvera à la fin de ce travail la liste des publications contenant ces observations, et que nous avons trouvées au Bureau central météorologique et à l'Observatoire de Nice. (Voir APPENDICE.)

Années.	A.	B.	Taches solaires.
		Déviations de la température moyenne en centièmes de degré centigrade.	
1870.....	-0°,29	-22 minimum	139,1 maximum
1871.....	- 9	-14	111,2
1872.....	- 8	- 7	101,7
1873.....	- 4	- 9	66,3
1874.....	- 22	-13	44,7
1875.....	- 6	-12	17,1
1876.....	- 13	- 5	21,3
1877.....	+ 13	+ 8	22,3
1878.....	+ 20	+13	3,4
1879.....	0	+ 6	6,0
1880.....	+ 5	+11	32,3
1881.....	+ 33	+20	54,3
1882.....	+ 3	+ 7	59,7
1883.....	- 9	-10	63,7 maximum
1884.....	- 27	-21 minimum	63,5
1885.....	- 20	-21	52,2
1886.....	- 16	-17	25,4
1887.....	- 16	- 5	13,1
1888.....	+ 26	+13	6,8
1889.....	+ 18	+15	6,3
1890.....	- 1	+ 6	7,1
1891.....	+ 10	+ 4	35,6
1892.....	- 1	- 5	73,0
1893.....	- 27	-12 minimum	84,9 maximum
1894.....	+ 2	- 5	78,0
1895.....	+ 1	+ 7	64,0
1896.....	+ 25	+20	41,8
1897.....	+ 28	+25	26,2
1898.....	+ 19	+19	26,7
1899.....	+ 10	+18	12,1
1900.....	+ 33	+25	9,5
			[2,7] (1901)

Les courbes ci-après représentent graphiquement ces résultats; la courbe des températures a été construite en prenant pour ordonnées les nombres de la colonne B; celle des taches en prenant pour ordonnées les nombres de la colonne « Taches solaires » du Tableau précédent, et en portant ces ordonnées négativement, de façon à figurer l'inverse de la fréquence des taches solaires.

Au premier regard jeté sur ces deux courbes leur parallélisme d'allure apparaît frappant.

Une discussion un peu détaillée va nous montrer que ce parallélisme se poursuit jusque dans les détails.

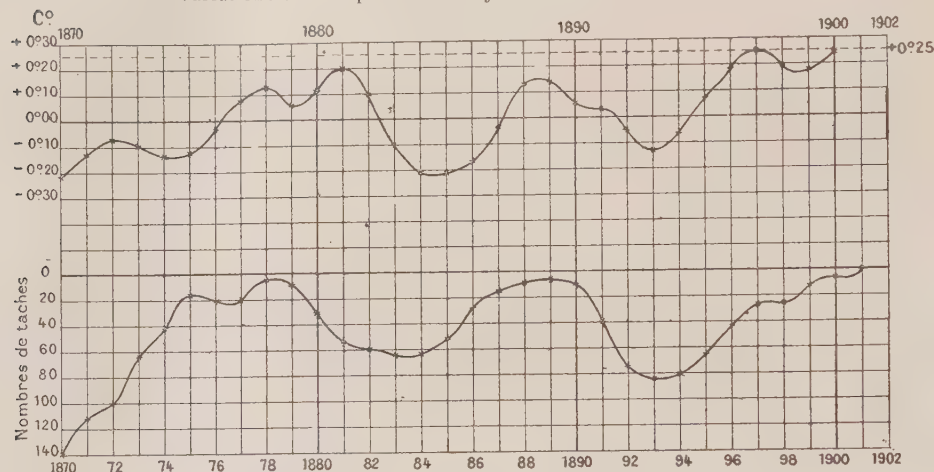
1° Si nous mettons en regard les dates des maxima et des minima respectifs de la courbe des températures et de celle des taches, nous obtenons le Tableau suivant :

Minima des températures.	Maxima des taches.	Maxima des températures.	Minima des taches.
1870	1870	1881	1878
1884,5	1883	1889	1889
1893	1893	1900	1901

Comme on le voit par ce Tableau, l'accord entre les époques des minima des températures et celles des maxima des taches d'une part, et entre celles des

Fig. 2.

Variations des températures moyennes annuelles de la Terre.



Courbe inversée de la fréquence des taches solaires.

maxima des températures et celles des minima des taches d'autre part, est très satisfaisant.

2° On sait que, dans la période des taches solaires, l'intervalle entre un minimum et le maximum suivant est plus court que l'intervalle entre ce maximum et le minimum qui le suit; les $2\frac{1}{2}$ périodes des taches comprises entre 1870 et 1901 n'échappent pas à cette règle. Or il est assez remarquable que les $2\frac{1}{2}$ périodes correspondantes de la température suivent également la même loi comme il ressort clairement du Tableau suivant :

INTERVALLES EN ANNÉES DES ÉPOQUES SUCCESSIVES DES MAXIMA AUX MINIMA RESPECTIFS
DES DEUX COURBES ET DES MINIMA AUX MAXIMA.

Époques.....	I	II	III	IV	V	VI
Max. taches. — Min. taches. —						
Taches.....	8	5	6	4	8	
Températures....	11	3,5	4,5	4	7	
Min. temp. — Max. temp. —						
Époques.....	I	II	III	IV	V	VI

On voit qu'on peut écrire les inégalités suivantes :

Pour les taches :

$$II \text{ -- } III < III \text{ -- } IV \quad \text{et} \quad IV \text{ -- } V < V \text{ -- } VI;$$

Et de même pour les températures :

$$II \text{ -- } III < III \text{ -- } IV \quad \text{et} \quad IV \text{ -- } V < V \text{ -- } VI.$$

De plus, il est remarquable que, pour les températures comme pour les taches, chacun des intervalles $II \text{ -- } III$ et $IV \text{ -- } V$ est plus petit que chacun des trois autres intervalles, $I \text{ -- } II$, $III \text{ -- } IV$ et $V \text{ -- } VI$ (ces derniers correspondant à l'intervalle d'un maximum des taches au minimum suivant); et cela malgré les durées inégales des $2\frac{1}{2}$ périodes des taches considérées : on a en effet une demi-période de 8 ans (1870 à 1878), puis une période de 11 ans (1878 à 1889), puis une période de 12 ans (1889 à 1901).

3° A un autre point de vue, si nous convenons de considérer comme « riches en taches » les années pour lesquelles le nombre relatif de Wolf est > 60 , et comme « pauvres en taches » celles pour lesquelles ce nombre est < 15 , nous pouvons former le Tableau suivant où nous mettons, en regard des années ainsi désignées, les déviations correspondantes de la température telles qu'elles ressortent de la courbe :

Années riches en taches.		Années pauvres en taches.	
1870.....	0	1878.....	+ 0,13
1871.....	— 0,22	1879.....	+ 0,06
1872.....	— 0,14	1887.....	— 0,05
1873.....	— 0,07	1888.....	+ 0,13
1873.....	— 0,09	1889.....	+ 0,15
1883.....	— 0,10	1890.....	+ 0,06
1884.....	— 0,21	1899.....	+ 0,18
1892.....	— 0,05	1900.....	+ 0,25
1893.....	— 0,12		
1894.....	— 0,05		
1895.....	+ 0,07		
Moyenne.....	= — 0,10	Moyenne.....	= + 0,11

Ici encore l'accord est extrêmement satisfaisant et conforme à la loi de parallélisme des deux courbes.

4° Considérons maintenant les années des maxima et des minima des taches; pour chacune de ces années (et afin d'éliminer les influences secondaires tout en laissant une importance prépondérante à l'année considérée) calculons la déviation de la température en prenant la moyenne du nombre de l'année et de la demi-somme de ceux de l'année précédente et de l'année suivante; et cal-

culons de même le nombre de taches pour chacune de ces années. Nous obtenons le Tableau suivant (dans lequel pour abrégé nous désignerons par $\delta\theta$ la déviation de la température et par δT le nombre de taches) :

Années de maxima des taches.			Années de minima des taches.		
	$\delta\theta$.	δT .		$\delta\theta$.	δT .
	⁰			⁰	
1870.	-0,19	129	1878.....	+0,10	9
1883... ..	-0,08	63	1889..	+0,12	7
1893.....	-0,08	80	1900.....	+0,21	5
Moyenne = -0,12			Moyenne = +0,14		

Il ressort de ce Tableau que, si l'on compare respectivement entre elles, d'une part pour les années de maxima des taches, les diverses valeurs ainsi obtenues de δT et les valeurs changées de signe de $\delta\theta$, on voit que ces valeurs varient dans le même sens et qu'aux valeurs plus ou moins grandes de δT correspondent des valeurs plus ou moins grandes de $-\delta\theta$; d'autre part, pour les années de minima des taches, le même parallélisme existe entre les valeurs de δT et celles de $-\delta\theta$. Ainsi, par exemple, au maximum maximorum de δT correspond le minimum minimorum de $\delta\theta$ et *vice versa*, ce qui résultait d'ailleurs immédiatement de l'examen des courbes.

Ici encore nous voyons que les deux courbes ont la même allure, jusque dans les détails.

5° Enfin nous pouvons faire le calcul suivant qui résume et renferme implicitement la plupart des résultats de la discussion précédente.

Considérons les $2\frac{1}{2}$ périodes de la courbe des températures, en prenant cette fois comme origine des ordonnées l'ordonnée marquée $+0^{\circ},25$ (qui correspond à l'année 1900 où le nombre des taches fut très voisin de 0), et comptons les ordonnées à partir de cette origine, positivement dans le sens négatif; si nous continuons à employer le symbole $\delta\theta$ pour désigner les ordonnées ainsi considérées, on voit que $\delta\theta$ représente en quelque sorte ici, pour chaque année (et toutes choses égales d'ailleurs), la différence entre ce que serait la température de l'année s'il n'y avait pas de taches et ce qu'elle est en réalité. Faisons maintenant la moyenne des ordonnées de la portion de cette courbe correspondant à la première demi-période (1870 à 1881) et multiplions cette moyenne par le nombre des années de cette demi-période, ce qui revient en somme à prendre l'intégrale de la courbe entre 1870 et 1881; prenons de même l'intégrale de la courbe pour la période de 1881 à 1889, puis pour la période de 1889 à 1900; et prenons de même les intégrales de 1870 à 1881, de 1881 à 1889 et de 1889 à 1900 de la courbe inversée des taches, les coordonnées étant de même

prises positivement dans le sens négatif, à partir de l'ordonnée : nombre de taches = 0 (1).

Nous obtenons ainsi une double série de trois nombres, que reproduit le Tableau suivant, avec en regard les valeurs correspondantes du rapport $\frac{\int \delta\theta}{\int \delta T}$:

Périodes.	$\int_{t_1}^{t_2} \delta\theta.$	$\int_{t_1}^{t_2} \delta T.$	$\frac{\int_{t_1}^{t_2} \delta\theta.}{\int_{t_1}^{t_2} \delta T.}$
$t_1 = 1870$ } $\frac{1}{2}$ pér. de θ	297	567	0,52
$t_2 = 1881$ }			
$t_1 = 1881$ } 1 pér. de θ	216	492	0,44
$t_2 = 1889$ }			
$t_1 = 1889$ } 1 pér. de θ	167	300	0,55
$t_2 = 1900$ }			
Moyenne = 0,5 $\pm$ 0,06			

On a donc :

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} \delta\theta}{\int_{t_1}^{t_2} \delta T} = 0,5 \pm 0,06 = \text{constante (sensiblement).}$$

Il y a donc une proportionnalité remarquablement constante entre le nombre total des taches solaires d'une part et la somme des diminutions des températures annuelles d'autre part, pendant chacune des périodes successives de la courbe des températures.

6° De la constance du rapport précédent il semble résulter que l'on peut attribuer, en quelque sorte (au point de vue de l'effet des taches solaires sur les températures terrestres), une signification physique moyenne à ces unités arbitraires que sont les « nombres de Wolf »; nous venons de voir, en effet, que sensiblement :

1 « nombre de Wolf » correspond à $0^{\circ},01 \times 0,5 = 0^{\circ},005$ C.

Nous pouvons, en définitive, énoncer la loi suivante, conforme à ce qu'avait annoncé Köppen :

« La température terrestre moyenne subit une période égale à celle des taches du Soleil; l'effet des taches est de diminuer la température terrestre moyenne : c'est-à-dire que la courbe qui représente les variations de celle-ci est parallèle à la courbe inversée de la fréquence des taches solaires (2). »

(1) Pour l'intégration de la courbe des températures, on a pris comme unité le centième de degré centigrade.

(2) Nous avons déduit cette loi de la discussion des données des stations tropicales, qui seules présentent un régime suffisamment régulier pour pouvoir y déceler une variation d'aussi faible

On pouvait jusqu'à un certain point prévoir qu'il doit en être ainsi : on sait, en effet, que le rayonnement des taches est moindre que celui de la photosphère (à surface égale); cela résulte de l'étude de leur spectre qui présente une absorption générale marquée par rapport au spectre de la photosphère, ainsi que des travaux bolométriques de Langley, lesquels ont établi que le noyau d'une tache émet environ 54 pour 100 seulement de la chaleur émise par un élément égal de la photosphère; d'autre part, à l'époque du maximum des taches, l'épaisseur de la couche absorbante de la chromosphère est notablement augmentée, ce qui tend encore à diminuer davantage le rayonnement du Soleil à ce moment; il est vrai qu'en revanche, lors du maximum des taches, il y a un plus grand nombre de facules, et l'on sait que les facules rayonnent plus de chaleur que la photosphère, ce qui doit tendre à balancer l'effet précédent.

Somme toute, la théorie était donc incapable de prévoir avec certitude laquelle de ces actions opposées est prépondérante, quoiqu'elle indiquât une certaine probabilité pour que la Terre reçoive moins de chaleur du Soleil, lors du maximum des taches. Seule l'étude de documents expérimentaux précis, comme les données de la température terrestre, pouvait résoudre définitivement ce problème.

amplitude; il semble qu'on peut légitimement l'appliquer à toute la surface de la Terre, car on ne conçoit pas comment une variation du rayonnement solaire pourrait produire certains effets sur la température de la moitié environ de la surface de la Terre (la portion comprise entre les tropiques est égale à 0,4 de la surface totale) sans agir dans le même sens sur le reste.

CHAPITRE III.

SUR LA COURONNE SOLAIRE.

Il nous a paru que l'on pourrait peut-être, à l'aide des données que nous venons d'obtenir, apporter quelque lumière sur les mystérieuses particularités de l'atmosphère coronale du Soleil.

Nous allons rapidement, auparavant, passer en revue les principaux résultats expérimentaux que l'étude des éclipses a apportés sur la structure de la couronne depuis le milieu du siècle dernier, et nous examinerons ensuite brièvement les quelques théories qui ont été présentées pour expliquer et coordonner entre eux ces résultats.

I. — Résumé de nos connaissances sur la nature de la couronne solaire.

Ce n'est que lorsque MM. Janssen et Lockyer eurent découvert le moyen d'observer les protubérances et la chromosphère en dehors des éclipses, que les astronomes portèrent leur effort vers l'étude de la couronne. Les premiers résultats furent obtenus dans cette voie par Young qui, lors de l'éclipse de 1870, trouva dans la couronne un spectre continu relativement intense dans lequel on distinguait quelques raies brillantes (celle de l'hydrogène et la raie verte $\lambda 531$, caractéristique de la couronne et observable à une grande hauteur au-dessus du disque). Dans l'éclipse de 1871, M. Janssen compléta cette découverte en reconnaissant, dans les parties extérieures de la couronne, quelques raies noires de Fraunhofer.

Dès ce moment, la composition complexe de la lumière coronale était connue. Et les observations de toutes les éclipses totales qui ont eu lieu depuis (et dont la dernière a été celle du 18 mai 1901) n'ont fait que confirmer, en les étendant et en les précisant, ces premiers résultats. Il ne saurait être question de décrire ici en détail les observations variées faites lors de chaque éclipse, et la riche moisson de faits nouveaux qui ont été apportés chaque fois, et dans laquelle la France a une large part grâce à des observateurs comme MM. de la Baume-Pluvinel et Deslandres. Bornons-nous à dire que les faits que l'on peut

considérer actuellement comme établis d'une manière certaine par les observations oculaires, spectrales et photographiques sont les suivants :

1° Une première partie de la couronne (1) est constituée par une atmosphère gazeuse qui donne au spectroscope notamment les raies brillantes de l'hydrogène et la raie verte caractéristique du coronium. Cette partie gazeuse a le caractère d'une atmosphère assez uniformément distribuée autour du Soleil, car, observée avec un spectroscope sans fente, tel qu'un prisme objectif, elle se manifeste sous la forme d'une série d'anneaux lumineux assez réguliers et dont chacun correspond à une des raies brillantes. Le plus brillant et le plus large de ces anneaux est toujours celui qui correspond à la raie verte $\lambda = 531^m\mu$.

2° Une deuxième partie de la couronne (celle qui apparaît plus particulièrement brillante à l'observation oculaire) est constituée (2) par des jets lumineux, des banderoles allongées et étendues, de forme et de dimensions variables selon les époques et les portions du disque d'où elles paraissent émaner (nous verrons au paragraphe 4° que ces variations se ramènent à deux types simples). Ces banderoles donnent au spectroscope un spectre continu, ce qui indique qu'elles sont constituées par des particules liquides ou solides incandescentes. En outre de leur spectre continu, ces banderoles incandescentes donnent un spectre frauenhoférien à raies noires, plus ou moins intense, dû à la lumière du disque solaire réfléchi par ces particules, comme le prouve d'autre part le polariscope.

Le spectre continu émis par les banderoles est beaucoup plus intense que le spectre frauenhoférien réfléchi, dans le voisinage du disque. Au contraire, dans les parties plus éloignées, le spectre frauenhoférien devient de plus en plus visible, et le polariscope indique identiquement d'autre part que la proportion de lumière polarisée est plus grande dans les parties de la couronne les plus éloignées que dans les parties voisines du disque. M. Janssen, qui a découvert, en 1871, les raies frauenhofériennes, les a, en effet, observées dans les parties les plus extérieures de la couronne et tous les observateurs ont depuis confirmé ce résultat, notamment M. Deslandres qui, en 1893 (3), a observé que le spectre à raies noires n'est plus visible dans les régions situées à moins de 5' du bord solaire, et par M. Perrine qui a observé, à l'aide de spectres photographiques, le même résultat en 1901. La lumière diffusée par les particules coronales est donc d'autant moins intense par rapport à la lumière propre de ces particules que l'on est plus près du disque solaire. La proportion de lumière diffusée est d'ailleurs toujours très faible.

(1) YOUNG, *Le Soleil*, p. 190; SCHEINER, *Spectralanalyse der Gestirne*, p. 205-207, etc.

(2) *Ibid.*

(3) *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, p. C.42.

Ce fait a surtout été mis en lumière par Schuster, qui de l'examen des spectres des éclipses de 1882, 1883 et 1886, a déduit que le spectre continu de la couronne a son maximum d'intensité actinique déplacé considérablement vers le rouge, en comparaison du spectre solaire, ce qui prouve que la lumière coronale ne peut être due qu'en faible proportion à de la lumière diffusée par les petites particules (voir *Nature*, t. XLIV, p. 375).

3° La partie gazeuse de la couronne est toujours distribuée d'une manière sensiblement uniforme autour du Soleil. Mais l'étendue et l'intensité des raies brillantes qu'elle émet sont très différentes selon qu'on l'observe lors d'une éclipse voisine d'un maximum des taches solaires, ou lors d'une éclipse voisine d'un minimum de ces taches ⁽¹⁾. Lors d'un maximum des taches solaires les raies de cette partie gazeuse sont bien plus lumineuses et visibles à une distance du limbe beaucoup plus grande que les années de minimum de l'activité solaire. Toutes les observations d'éclipses depuis 1870 ont, sans exception, nettement établi ce fait. En 1874, par exemple, année voisine d'un maximum des taches, M. Stone a pu déceler pendant l'éclipse la raie du coronium à plus de 45' du bord solaire et cette raie était très brillante. Au contraire, lors du minimum de 1878, on ne put l'observer à plus de 15' du limbe et elle était devenue si faible que beaucoup d'observateurs ne la virent pas du tout ⁽²⁾. Toutes les éclipses ultérieures ont confirmé ces faits; en 1882, par exemple (maximum des taches), on observa cette raie à plus de 40' du bord ⁽³⁾; en 1893, lors de l'éclipse du Sénégal, elle était également très brillante et étendue; au contraire, lors des deux dernières éclipses (celle de 1900 et celle de 1901), qui eurent lieu lors du minimum des taches solaires, la raie verte était très faible et ne se voyait que jusqu'à 5' du bord solaire ⁽⁴⁾. Beaucoup d'observateurs ne la virent même pas du tout, et ceux qui l'observèrent disent qu'elle était courte et peu nette ⁽⁵⁾.

4° Les banderoles de particules incandescentes de la couronne subissent également des variations qui sont en rapport avec la période des taches solaires dans leur structure, leur étendue et leur éclat.

Lors des quatre minima de l'activité solaire qui ont eu lieu depuis la seconde moitié du siècle dernier (1867, 1878, 1889, 1900) on a eu la bonne fortune d'observer des éclipses totales de Soleil et lors de chacune de ces quatre éclipses les filaments incandescents de la couronne ont montré identiquement la même structure générale et les mêmes caractères (que Young avait déjà reconnus

⁽¹⁾ Mrs TODD, *Total eclipses of the Sun*. — YOUNG, *Le Soleil*, p. 191.

⁽²⁾ YOUNG, *loc. cit.*, p. 186.

⁽³⁾ *Bull. Société astr. de France*, 1892, p. 269.

⁽⁴⁾ DE LA BAUME-PLUVINEL, *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 1523.

⁽⁵⁾ DESLANDRES, *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 1691. — WHITNEY, *The astrophysical Journal*, t. XII, p. 96. — C.-A. YOUNG, *The astrophys. Journ.*, t. XII, p. 77, etc.

comme caractéristiques des couronnes de minima à la suite des éclipses de 1867 et 1878) ⁽¹⁾, et qui sont les suivants ⁽²⁾ :

Les banderoles de la couronne se développent surtout avec abondance dans les régions de l'équateur solaire; elles s'étendent dans ces régions radialement au disque solaire jusqu'à des distances très grandes, supérieures à plusieurs diamètres et même, comme en 1878, à 12 diamètres solaires; ces banderoles sont très brillantes dans le voisinage immédiat du Soleil et leur lumière diminue graduellement à mesure qu'elles s'éloignent du disque pour s'éteindre progressivement à une très grande distance; dans les régions plus éloignées de l'équateur solaire, et à mesure qu'on s'approche des pôles, les banderoles sont beaucoup moins étendues; elles ne dépassent guère une distance égale à un demi-diamètre du Soleil; et de plus elles affectent la forme d'aigrettes et de gerbes curvilignes qui ont une tendance à s'incliner vers les parties équatoriales. L'ensemble, composé de filaments convergents dont la courbure augmente et dont l'étendue diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur vers les pôles du Soleil, constitue la structure syncline que M. Ranyard a été le premier à mettre clairement en lumière.

Lors des éclipses qui ont eu lieu dans des années plus voisines du minimum que du maximum des taches la couronne présente la même structure générale, mais les banderoles équatoriales sont déjà beaucoup moins étendues que lors d'un minimum.

Telles ont été les couronnes de 1880 et de 1898 ⁽³⁾.

Enfin, lors des cinq éclipses qui ont été observées au voisinage de maxima de taches (celles de 1870, 1871, 1882, 1883, 1893) la couronne a présenté les caractères suivants : les banderoles équatoriales, incomparablement moins étendues que les années de minima, n'avaient guère plus d'extension que les filaments polaires, de sorte que les rayons coronaux paraissaient à peu près répartis également tout autour du limbe; de plus, la courbure des aigrettes polaires était distribuée moins symétriquement et moins régulièrement que lors des minima des taches, l'ensemble des rayons ayant une structure moins symétrique et les irrégularités de formes paraissant d'ailleurs tenir à des causes locales et accidentelles, car elles variaient beaucoup d'une éclipse solaire à une autre, et même d'une région à une autre du disque ⁽⁴⁾. La structure générale syncline était d'ailleurs la même qu'aux époques de minima de l'activité solaire,

⁽¹⁾ YOUNG, *Le Soleil*, p. 192.

⁽²⁾ Voir dans *The Observatory*, 1898, p. 102, les photographies des couronnes de 1867, 1878 et 1889 et dans *The Observatory*, 1901, octobre, p. 365, celle de l'éclipse de 1900.

⁽³⁾ Voir photographie de la couronne de 1898 dans *Monthly Notices of the royal astronomical Society*, t. LVIII, Pl. VIII, et couronne de 1880, *The Observatory*, t. XXI, p. 102.

⁽⁴⁾ Voir photographie de la couronne de 1871, 1882 et 1893, *The Observatory*, t. XVII, p. 95, et de celles de 1870 et 1883, *Id.*, t. XXI, p. 102, et *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, Pl. III.

avec cette différence que les rayons équatoriaux avaient une extension beaucoup moins grande ⁽¹⁾.

5° Il n'y a pas de connexion directe entre la partie gazeuse et les filaments lumineux de la couronne. Cela ressort de ce fait que tandis que la partie gazeuse est uniformément distribuée autour du Soleil, les filaments incandescents ont une structure particulière très différente, étant en général beaucoup plus étendus dans les régions équatoriales, et dépassant de beaucoup dans ces régions la largeur de la zone gazeuse incandescente; cela ressort aussi de ce que ces deux parties de la couronne ont des phases exactement inverses, la plus grande extension de la partie gazeuse, qui a lieu lors du maximum des taches, correspondant précisément à l'extension minima des banderoles; enfin, cela ressort surtout nettement du fait souvent constaté que les raies gazeuses de la couronne sont juste aussi brillantes dans l'intervalle obscur (*rift*, comme disent les Anglais) de deux banderoles lumineuses, qu'au milieu de l'une d'elles ⁽²⁾.

II. — Examen sommaire des principales théories proposées.

Parmi les hypothèses présentées pour expliquer la couronne solaire, quelques-unes, basées sur des principes rigoureux et sur l'examen plus ou moins judicieux des faits d'observation, ont particulièrement retenu l'attention des astronomes. Ce sont par ordre de dates : (a) la *Théorie météorique*; (b) la *Théorie éruptive*; (c) la *Théorie magnétique*; (d) la *Théorie cathodique*, de M. Deslandres; (e) enfin, la *Théorie de M. Arrhénius*.

Nous allons les passer successivement en revue. Des trois premières nous ne dirons que quelques mots, car il a été démontré à diverses reprises qu'elles ne rendent compte qu'imparfaitement des faits d'observations, et qu'elles sont même, comme nous allons voir, fréquemment en contradiction avec eux. Comme l'a fait observer M. Deslandres ⁽³⁾, dans ces théories relativement anciennes, et qui comme telles n'ont pu s'appuyer que sur un nombre restreint d'observations d'éclipses, on a cherché à expliquer les formes observées avec la simple lunette et l'on a négligé les recherches du spectroscope qui ont cependant une importance capitale. Nous ajouterons que, dans ces Théories, on ne paraît pas, comme nous allons le voir, avoir tenu suffisamment compte des variations périodiques, si

(1) En outre de ces variations de la structure et de l'extension des jets, les observateurs ont constamment remarqué que l'éclat de cette partie de la couronne et l'intensité du spectre continu qu'elle donne sont sensiblement moins vifs les années de maxima des taches que les années de minima (voir notamment, à ce sujet, l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, 1884, p. 868; *Astrophys. Journal*, t. XII, p. 96; *Yerkes observatory Bulletin*, t. XIV; etc.).

(2) YOUNG, *Le Soleil*, p. 191; SCHNEIDER, *Spectralanalyse der Gestirne*, p. 205.

(3) *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, p. C.55.

caractéristiques cependant, des diverses parties de la couronne. Nous nous étendrons un peu plus longuement sur les théories de M. Deslandres et de M. Arrhénius, qui, plus récentes, ont profité d'un plus grand nombre de faits d'observation, et ont su éviter quelques-unes des objections faites aux hypothèses antérieures.

(a) *Théorie météorique.* — Cette théorie, qui explique la couronne par des essaims de météores circulant autour du Soleil et très près de celui-ci, est déjà ancienne. Séduisante en apparence par sa simplicité, elle a été adoptée à un moment par sir Norman Lockyer (¹). Elle explique bien l'extension équatoriale des rayons coronaux; mais en revanche elle fléchit sur tous les autres points : 1° elle n'explique pas les jets courbes des latitudes élevées; 2° elle est en contradiction avec les observations spectrales, comme Huggins l'a montré par une discussion approfondie (²); 3° elle implique une très grande vitesse des parties extérieures de la couronne qui doivent participer au mouvement rapide des météores; or, M. Deslandres a démontré que la vitesse de la couronne observée au spectroscope donne un nombre beaucoup plus faible (³); 4° enfin, M. Huggins a démontré qu'il est impossible de ne pas considérer la couronne comme un appendice émané directement du Soleil et lui appartenant (⁴), et ce fait est incontesté aujourd'hui.

(b) *Théorie éruptive de Schœberlé.* — Cette théorie, qui explique la couronne par des éruptions de matière lancées de la photosphère, a été développée par M. Schœberlé dans un premier Mémoire (⁵) en 1889. Dans ce travail, l'auteur estimait pouvoir expliquer par des éruptions normales à la surface et réparties uniformément dans la latitude moyenne des taches solaires (15°), les rayons courbes des pôles et les divers autres aspects de la couronne. M. Schœberlé crut même pouvoir prédire théoriquement quelle serait la forme de la couronne lors de l'éclipse de 1893 (⁶). Or l'observation montra une couronne dont la forme n'avait aucun rapport avec celle qui résultait des prévisions de Schœberlé (⁷). A la suite de cette éclipse, il modifia sa première théorie dans un second Mémoire (⁸) : les centres d'éruptions seraient distribués irrégulièrement sur la

(¹) LOCKYER, *Meteoric Hypothesis*.

(²) *Proceed. of the Royal Society*, t. XXXIX, p. 123.

(³) *Loc. cit.*, t. C, p. 57.

(⁴) *Loc. cit.*, p. 127.

(⁵) *Report of the Lick observatory*.

(⁶) *Astronomy and Astrophysics*, 1893, p. 7.

(⁷) *Astronomy and Astrophysics*, p. 765, et A. DE LA BAUME-PLUVINEL, *Comptes rendus*, t. CXVII, p. 26-29.

(⁸) *Astronomy and Astrophysics*, p. 730.

surface solaire, ou jalonnés par les taches et facules, les vitesses de projection ayant des directions et des grandeurs quelconques, et le mouvement serait alors seulement déterminé par la vitesse initiale et la gravitation. Les rayons courbes de la couronne moyenne seraient alors des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers.

Comme divers auteurs l'ont fait remarquer, on peut douter *a priori* que la photosphère qui est formée de nuages incandescents puisse être le siège d'éruptions analogues aux volcans de la croûte terrestre et capable d'imprimer à la matière une vitesse de projection qui dans cette hypothèse devrait être comme l'a remarqué Newcomb ⁽¹⁾ supérieure à 350^{km} par seconde et devrait demeurer aussi grande jusqu'à une hauteur de plus de $15'$ au-dessus du Soleil. Or M. Deslandres, au cours de trois années d'observations spectrales suivies, faites lors du dernier maximum de l'activité solaire, n'a pas relevé une seule fois de vitesses aussi considérables, la plus grande observée par lui ayant été de 140^{km} par seconde et ne s'étant maintenue que 3 minutes. L'observation montre, et tous les observateurs sont d'accord sur ce point, que les variations de vitesse des protubérances sont rapides et que les grandes vitesses durent peu. Si l'hypothèse de Schœberlé était exacte, les jets de la couronne devraient donc être irréguliers et discontinus. Or, ils sont au contraire sans solution de continuité ; ils peuvent être suivis avec une largeur régulière sur une très grande longueur, et, durant les quelques heures d'une même éclipse, ils ne varient pas sensiblement ⁽²⁾. Les observations spectrales sont donc contraires à l'hypothèse éruptive, comme l'a remarqué M. Deslandres ⁽³⁾.

Enfin, tout récemment, M. Bredichin, dans une étude approfondie de la courbure des jets coronaux, a montré que les faits ne s'accordent pas avec la théorie mécanique de Schœberlé ⁽⁴⁾.

Nous ajouterons à cela que cette théorie ne tient aucun compte de la partie gazeuse de la couronne et n'explique pas les variations caractéristiques de cette partie gazeuse, qui sont, comme nous l'avons vu, exactement l'inverse des variations correspondantes des jets coronaux.

(c) *Théorie magnétique de M. Bigelow.* — Dans cette hypothèse présentée en 1893, M. Bigelow ⁽⁵⁾ suppose le Soleil aimanté fortement et dans les mêmes conditions que la Terre, c'est-à-dire avec des pôles magnétiques voisins des pôles de rotation. Nous verrons dans un prochain Chapitre la difficulté qu'il y a à sup-

⁽¹⁾ *Popular Astronomy*, p. 260.

⁽²⁾ *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, p. C. 61.

⁽³⁾ *Ibid.*

⁽⁴⁾ *Bull. de l'Acad. de Saint-Petersbourg* (5) 9, 179-207.

⁽⁵⁾ *Astronomy and Astrophysics*, 1893, p. 97, 707, 821.

poser le Soleil magnétique. Mais à cette hypothèse, M. Bigelow en ajoute une autre qui consiste à supposer que les particules de la couronne sont elles-mêmes douées de propriétés magnétiques analogues à celles de la limaille de fer et qui les feraient s'orienter suivant les lignes de force du Soleil dont M. Bigelow a calculé les directions. Il est certain que cette théorie explique assez bien la courbure de jets coronaux des hautes latitudes; mais elle ne rend pas compte de la forme et de l'extension des jets équatoriaux; et, d'autre part, elle ne tient pas compte de la partie gazeuse de la couronne et de ses variations périodiques. D'ailleurs, avant l'éclipse de 1893, M. Bigelow a prédit théoriquement la forme que devrait nécessairement avoir la couronne si son hypothèse était exacte. Or, la couronne qui fut observée était entièrement différente ⁽¹⁾. Si nous ajoutons à cela que cette théorie repose sur une série d'hypothèses difficilement admissibles, on comprendra qu'elle soit aujourd'hui abandonnée.

(d) *Théorie cathodique de M. Deslandres.* — L'hypothèse d'un rayonnement cathodique émané du Soleil a été présentée par Goldstein en 1880 ⁽²⁾, et appliquée plus particulièrement par lui aux phénomènes cométaires et à l'étude des perturbations magnétiques. M. Birkeland a plus particulièrement appliqué cette hypothèse à la théorie des aurores boréales, comme nous le verrons dans un prochain Chapitre. Mais c'est M. Deslandres qui, le premier, semble-t-il, a songé à l'étendre à l'étude de la couronne solaire ⁽³⁾; la théorie cathodique de la couronne a été développée par lui dans un fort intéressant Mémoire paru dans les *Annales du Bureau des Longitudes* de 1897.

Dans ce Mémoire, M. Deslandres est amené, par diverses considérations, à supposer : 1° que les parties supérieures de la chromosphère sont électrisées négativement par rapport à la surface du Soleil, c'est-à-dire qu'il existe dans l'atmosphère solaire un champ électrique analogue à celui de l'atmosphère terrestre mais de sens inverse (on sait, en effet, que les couches supérieures de notre atmosphère sont positives par rapport au sol); 2° que les diverses parties de la chromosphère émettent des rayons cathodiques à peu près normaux qui illuminent par phosphorescence les poussières cosmiques répandues autour du Soleil; 3° que les plages brillantes de la chromosphère émettent des jets cathodiques plus actifs que ceux des régions voisines, et qui produiraient les rayons droits ou courbes de la couronne, les formes courbes étant dues au champ magnétique du Soleil et aux répulsions mutuelles des rayons; 4° enfin, en ce qui concerne la partie gazeuse de la couronne, M. Deslandres admet avec Huggins qu'elle

(1) A. DE LA BAUME-PLUVINEL, *Comptes rendus*, t. CXVII, p. 26-29.

(2) GOLDSTEIN, *Eine neue Form electrischer Abstossung*, 1880.

(3) DESLANDRES, *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, 1897, p. C.52-74.

est constituée par de petites atmosphères entourant chacune des particules des rayons coronaux, et illuminées par l'induction due à l'écoulement continu d'électricité qui se produirait à travers les parties basses de l'atmosphère solaire par suite du champ électrique intense de celle-ci. (Nous reviendrons plus particulièrement sur cette dernière partie de la théorie de M. Deslandres à la fin de ce Chapitre.)

Il est certain que cette théorie, malgré la série d'hypothèses qu'elle accumule (et dont quelques-unes soulèvent, comme nous allons voir, des objections inévitables), explique assez bien pourquoi les jets coronaux doivent être en général visibles sur une plus grande étendue dans les basses latitudes du Soleil que dans les régions polaires; les rayons cathodiques émanés des plages brillantes de la chromosphère, qui correspondent aux facules du disque, doivent être en effet plus intenses là où les facules sont nombreuses, c'est-à-dire dans la zone des taches. Mais un examen plus approfondi montre qu'elle est, semble-t-il, sur des points essentiels, inconciliable avec les faits, et que les hypothèses sur lesquelles elle repose s'accordent difficilement avec les données les mieux établies de l'électricité. En effet :

1° D'après cette théorie, les jets cathodiques sont émis avec le plus d'intensité par les plages brillantes de la chromosphère qui correspondent aux facules du disque. D'autre part, il est connu que, lors du maximum des taches solaires, les facules ⁽¹⁾ sont très nombreuses dans la zone des taches, et beaucoup moins dans les latitudes plus élevées.

Au contraire, lors du minimum des taches (les facules étant d'ailleurs partout moins nombreuses), la répartition des facules sur le disque est sensiblement uniforme. Si la théorie cathodique était exacte, il devrait s'ensuivre nécessairement que lors du maximum des taches la couronne présente des jets équatoriaux beaucoup plus étendus que les banderoles polaires, tandis que lors du maximum l'extension des jets devrait être plus sensiblement uniforme tout autour du disque. Or *c'est exactement l'inverse qui a été constamment observé* ⁽²⁾, la couronne ayant toujours été trouvée sans extension marquée dans une direction les années de maxima des taches (1870, 1883, 1893) et présentant toujours une extension marquée dans les régions équatoriales les années de minima (1867, 1878, 1889, 1898, 1899, 1900) ⁽³⁾.

2° L'intensité des jets cathodiques devant être beaucoup plus intense, d'après la théorie de M. Deslandres, les années de grande activité solaire (les facules

(1) Ce que nous disons des facules s'applique aussi bien aux plages brillantes de la chromosphère, qui correspondent toujours aux facules du disque et dont la position et les variations sont les mêmes. (Voir DESLANDRES, *loc. cit.*, p. C.55, 56, 68, 71.)

(2) Voir plus haut, I, § 4°.

(3) Voir DESLANDRES, *loc. cit.*, p. C.31.

étant en effet beaucoup plus nombreuses et vives ces années que les années de minima), il devrait nécessairement s'ensuivre que les jets coronaux soient visibles jusqu'à une bien plus grande distance du Soleil les années de maxima que les années de minima des taches. Or *c'est ici encore exactement l'inverse qui a toujours été observé* ⁽¹⁾.

3° Pour expliquer la courbure des jets coronaux, M. Deslandres invoque après M. Bigelow le champ magnétique du Soleil, et la répulsion mutuelle des rayons. Or, d'une part, M. Deslandres a lui-même, dans une autre partie de son Mémoire ⁽²⁾, réfuté la théorie de M. Bigelow à cause des hypothèses difficilement admissibles qu'elle implique et que lui-même reprend en partie ⁽³⁾; et d'autre part, il est établi actuellement, et contrairement à ce qu'on croyait il y a une dizaine d'années, que les rayons cathodiques n'exercent pas de répulsion mutuelle, et que les actions observées tiennent à l'électrisation des diverses parties du tube cathodique ⁽⁴⁾.

4° Enfin, il semble que la théorie de M. Deslandres contient en elle-même sa réfutation. M. Deslandres est amené, en effet, à admettre, d'accord en cela comme nous allons le voir avec ceux qui ont eu à envisager l'hypothèse d'un champ électrique du Soleil, que le champ électrique de l'atmosphère solaire a le signe inverse de celui du champ terrestre, les couches élevées de l'atmosphère du Soleil étant négatives par rapport à la photosphère sous-jacente ⁽⁵⁾. Or, les rayons cathodiques qui peuvent être produits, dans ces conditions, dans les parties élevées de la chromosphère, ne peuvent se propager que *vers le bas et non vers l'extérieur*. Cela résulte évidemment des expériences connues de M. Perrin sur la mesure de la chute de potentiel à la cathode ⁽⁶⁾: ces expériences ont montré que les rayons cathodiques produits par une chute de potentiel donnée sont complètement arrêtés par un champ antagoniste de valeur égale. Or, il est évident que la différence de potentiel des décharges de l'atmosphère solaire ne peut qu'être inférieure ou, à la limite, égale à la valeur du champ électrique du Soleil, puisque ces décharges sont dues à ce champ lui-même. Il s'ensuit que les rayons cathodiques que peuvent produire ces décharges ne peuvent se propager vers l'extérieur.

Il semble donc, en définitive, que, malgré les points de vue nouveaux qu'elle a apportés, la théorie de M. Deslandres est difficilement admissible.

Deux auteurs, en dehors de M. Deslandres, se sont, à notre connaissance,

(1) Voir plus haut, I, § 4°.

(2) Voir DESLANDRES, *loc. cit.*, p. C.62.

(3) Voir plus haut, § (c).

(4) Voir VILLARD, *Les rayons cathodiques* (*Rapports du Congrès de Physique*, 1900).

(5) *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, p. C.71.

(6) VILLARD, *Les rayons cathodiques*.

préoccupés du potentiel électrique que peut posséder le Soleil et du signe de son champ électrique ; ce sont M. Werner Siemens en 1883 ⁽¹⁾ et M. Arrhénius tout récemment ⁽²⁾. Ils sont tous deux, et par des voies très différentes (M. W. Siemens par la considération des phénomènes électriques que produisent les flammes, le frottement des gaz contre les particules solides et les phénomènes de dissociation ; et M. Arrhénius, d'autre part, grâce aux données et aux notions plus modernes sur la mobilité et les autres propriétés des ions positifs et négatifs), arrivés à la conclusion, admise d'autre part par M. Deslandres, à savoir : que le potentiel de la surface solaire doit être positif par rapport à celui des parties extérieures, c'est-à-dire que le champ de l'atmosphère solaire a le sens inverse de celui du champ atmosphérique terrestre, et doit s'opposer par suite complètement à toute émission vers l'extérieur de rayons cathodiques produits dans le Soleil.

Nous avons dit (et nous y reviendrons au cours de ce travail) que M. Goldstein a proposé d'expliquer divers phénomènes cométaires par une émission cathodique émanée du Soleil, et que M. Birkeland a appliqué cette idée à la théorie des aurores boréales.

On voit dès maintenant, par les considérations qui précèdent, que l'idée même d'une pareille émission constitue, semble-t-il, une hypothèse fort improbable.

(e) *Théorie de M. Arrhénius.* — Dès 1871, Young avait montré ⁽³⁾ que les rayons coronaux ont de fréquentes similitudes de forme avec les queues de comètes, et semblent démontrer comme celles-ci l'existence sur le Soleil de forces répulsives capables d'annuler complètement, dans certains cas, la pesanteur ; Huggins est arrivé à la même conclusion ⁽⁴⁾ et il a montré que, par le simple examen des photographies de la couronne, on est conduit inévitablement (*irresistibly*) à admettre l'existence dans le Soleil de pareilles forces répulsives ; il énonça à ce sujet, il y a une vingtaine d'années, diverses idées fort intéressantes sur la constitution de la couronne ; nous les examinerons plus particulièrement dans la troisième partie de ce Chapitre, à propos des conditions d'équilibre de la partie gazeuse de la couronne.

Or, Maxwell a démontré théoriquement que les ondes lumineuses produisent une pression sur les corps qu'elles frappent. La preuve expérimentale peut être considérée comme établie par les expériences récentes de M. Lebedeff ⁽⁵⁾. En

(1) *Sitzungsberichte der k. preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1883, t. XXVI.

(2) *Revue générale des Sciences*, 1902, p. 69.

(3) YOUNG, *Americ. Journ. of Science*, mai 1871, p. 7.

(4) HUGGINS, *Barkerian Lecture*. (*Proceedings of the Royal Society*, t. XXXIX, p. 108.)

(5) *Rapports du Congrès international de Physique*, 1900, et *Wiedemann's Annalen*, 1901 (3), p. 433-458.

partant de là, M. Arrhénius a institué une fort intéressante théorie des queues cométaires, des aurores boréales et de divers autres phénomènes; nous y reviendrons plus particulièrement dans les prochains Chapitres, consacrés précisément à l'étude de ces phénomènes. Mais, dès maintenant, nous allons examiner brièvement la partie du Mémoire de M. Arrhénius qui concerne plus spécialement la couronne, et qui d'ailleurs n'est qu'une partie secondaire de l'ensemble de son travail.

D'après M. Arrhénius ⁽¹⁾, le rayonnement du Soleil repousserait loin de cet astre, avec des vitesses dépendant de leur dimension et de leur densité, les particules solides ou liquides qui se trouvent au-dessus de la photosphère; la grandeur de la répulsion et le nombre des particules repoussées seraient particulièrement considérables au-dessus de la zone des taches solaires, et, d'autre part, le nombre des particules repoussées et l'intensité de la force répulsive seraient, d'après M. Arrhénius, beaucoup plus grands lors du maximum que lors du minimum des taches, par suite des deux circonstances suivantes, que suppose M. Arrhénius : 1° la présence des taches doit favoriser, par suite des éruptions superficielles, la répulsion des particules; 2° le Soleil doit rayonner plus de chaleur les années de taches que lorsqu'il est à son minimum d'activité.

Les rayons de la couronne seraient produits dans ces conditions; mais dans leur trajet les petites particules se réunissent en d'autres plus grosses, pour lesquelles la pesanteur finit par dépasser la force répulsive et qui retombent alors sur le Soleil, en produisant les formes incurvées des jets coronaux. Telle est l'explication, que propose M. Arrhénius, de la couronne solaire. Nous remarquerons qu'il ne parle pas de la partie gazeuse. Mais, même en ce qui concerne les filaments de particules, l'effet de la pression de radiation, envisagé de cette manière, paraît sur plusieurs points difficilement conciliable avec les faits observés.

Et d'abord, est-il réellement probable, comme le pense M. Arrhénius, que la présence de taches sur le Soleil doive correspondre à la suspension, dans son atmosphère, d'un plus grand nombre de particules? Tous les astronomes qui se sont occupés plus particulièrement des taches, Faye ⁽²⁾ et, avec lui, Newcomb, Langley ⁽³⁾, Young ⁽⁴⁾ et le P. Secchi ⁽⁵⁾ d'autre part, dont les idées sont sur tant d'autres points différentes de celles de Faye, se sont accordés à reconnaître que si, comme on l'avait cru un certain temps, les taches étaient produites par des éruptions vers l'extérieur de gaz chauds, le spectre de l'ombre d'une tache

⁽¹⁾ *Rev. gén. des Sciences*, 1902, p. 65-69.

⁽²⁾ YOUNG, *Le Soleil*, p. 136-137.

⁽³⁾ NEWCOMB, *Popular Astronomy*, p. 281.

⁽⁴⁾ *Ibid.*, p. 278.

⁽⁵⁾ YOUNG, *Le Soleil*, p. 136.

devait se composer de raies brillantes ; que ce spectre indique au contraire une absorption augmentée et indique par suite, non pas une sortie violente de gaz échauffés à travers la photosphère, mais une descente de matière plus froide et moins lumineuse ⁽¹⁾. Donc, loin de projeter de la matière vers l'extérieur, le courant descendant qui forme la tache doit, au contraire, aspirer vers le bas les particules situées au-dessus ; il est vrai, d'autre part, que les taches sont généralement entourées de facules ; mais celles-ci sont moins des éruptions, à proprement parler, que des nuages photosphériques un peu plus élevés que le niveau moyen de la photosphère, et, comme le dit Young ⁽²⁾, « tout se passe comme s'il y avait réellement une sorte d'aspiration vers le centre de la tache, aspiration capable d'attirer dans l'intérieur de la tache toutes les matières éruptives situées dans le voisinage ». Donc, à ce point de vue, la supposition de M. Arrhénius n'est qu'une conjecture, qui n'est pas plus vraisemblable que l'hypothèse exactement inverse, et qui l'est plutôt moins.

En second lieu, M. Arrhénius admet que le Soleil rayonne plus de chaleur lorsqu'il est couvert de taches ; or nous avons, dans un Chapitre précédent, fait une étude aussi complète que possible de cette question ; nous avons discuté, en particulier, l'unique observation sur laquelle M. Arrhénius appuie son hypothèse et nous sommes arrivé à la conclusion suivante, que démontre l'ensemble des observations : *le Soleil rayonne moins de chaleur lors du maximum que lors du minimum des taches.*

Enfin, si les hypothèses de M. Arrhénius étaient exactes, il devrait nécessairement s'ensuivre : 1° que les filaments de la couronne situés au-dessus de la zone des taches ont, par rapport aux filaments des rayons solaires, une extension beaucoup plus grande lors du maximum que lors du minimum des taches ; 2° que ces filaments sont beaucoup plus brillants et beaucoup plus étendus lors du maximum que lors du minimum de l'activité solaire. Or, c'est précisément l'inverse, sur tous ces points, qui a été constamment démontré par l'observation. (Voir ci-dessus, I, 4°.)

Répétons d'ailleurs que l'étude de la couronne n'a été faite qu'incidemment par M. Arrhénius, au cours de sa théorie des comètes et des aurores boréales. Nous y reviendrons plus particulièrement à propos de ces phénomènes.

Il est néanmoins un fait indiqué par M. Arrhénius qui paraît irréfutable et que nous voulons retenir. C'est que le rayonnement solaire doit, en vertu de la pression de radiation Maxwell-Bartoli, exercer une répulsion sur les particules situées au-dessus de la photosphère.

En résumé, si chacune des théories que nous venons d'examiner mérite de

(1) YOUNG, *Le Soleil*, p. 136.

(2) *Ibid.*, p. 140.

fixer l'attention, si toutes ont, en quelque sorte, fait faire un progrès à la question par les aperçus ingénieux ou les points de vue nouveaux qu'elles ont apportés, il semble qu'aucune d'elles ne constitue une explication pleinement satisfaisante des phénomènes observés. Et il nous a paru qu'en nous aidant de ces aperçus nouveaux, il ne nous serait peut-être pas impossible, grâce aux principes établis dans les premiers Chapitres de ce travail, d'apporter quelques éléments satisfaisants à la solution du problème coronal. C'est ce que nous allons entreprendre de démontrer.

III. — Recherches personnelles sur la question.

Nous avons vu ⁽¹⁾ que la partie gazeuse de la couronne et les filaments coronaux, qui donnent un spectre continu, ont, en outre des différences de leurs caractères spectraux, des formes, des structures et des étendues qui n'ont aucun rapport entre elles et que les variations périodiques que subissent l'une et l'autre de ces parties de la couronne sont extrêmement différentes et même, à certains points de vue, opposées. Elles se présentent à nous comme deux phénomènes nettement distincts et nous allons les étudier successivement, pour plus de commodité.

A. — Une première question se pose : A quoi est dû l'état d'incandescence des particules solides ou liquides qui constituent les rayons coronaux ? Nous avons vu que la théorie cathodique l'expliquait par un phénomène de phosphorescence dû aux rayons cathodiques, tandis que dans la théorie météorique cette incandescence serait due au frottement des particules dans leur trajet rapide à travers l'atmosphère solaire, par un phénomène analogue à celui qui illumine les étoiles filantes quand elles traversent notre atmosphère. Mais nous avons vu que la théorie cathodique et la théorie météorique ne paraissent pas admissibles, et, quoique l'explication que donne cette dernière de l'incandescence des particules coronales paraisse séduisante à première vue, un examen plus approfondi montre qu'elle n'est guère acceptable : en effet (comme nous l'indiquerons au paragraphe B), l'atmosphère visible du Soleil est loin de s'étendre aussi loin que les filaments de la couronne, et même en supposant qu'elle s'étende aussi loin sous une forme invisible avec nos instruments, elle doit avoir une densité tellement faible qu'on ne conçoit pas comment elle pourrait produire l'incandescence des particules qui s'y déplacent : cela résulte incontestablement de toutes les observations des comètes ; la comète de 1843, par exemple, a passé à 3' ou 4' seulement de la surface du Soleil, c'est-à-dire bien au dedans de la limite exté-

(1) Voir ci-dessus, I, § 5^o et *passim*.

rière de la couronne visible, et dans cette partie de son trajet elle avait une vitesse d'au moins 550^{km} par seconde ⁽¹⁾; or elle n'a subi de modification observable ni de sa forme ni de son mouvement. Il ne paraît donc pas possible d'attribuer l'incandescence des particules coronales à la cause indiquée par la théorie météorique; car, si cette explication était vraie, la comète de 1843 aurait dû être complètement vaporisée par son passage près du Soleil.

L'idée la plus naturelle est que ces particules sont portées à la température de l'incandescence par le rayonnement intense qu'elles reçoivent de la photosphère et le calcul confirme cette manière de voir. Nous pouvons grossièrement nous en faire une idée approximative de la manière suivante :

On peut sans erreur sensible, comme l'a montré M. Ch.-Ed. Guillaume, considérer que le Soleil, qui envoie son rayonnement dans l'espace, se trouve au centre d'une enceinte fermée de dimensions infiniment grandes et dont la température est le zéro absolu. Or, supposons qu'un corps noir sphérique intercepte une partie du rayonnement solaire; la loi de Stephan donne la température absolue τ qu'elle prendra par la formule

$$n\tau^4 = T^4 \quad (2)$$

où T est la température absolue du Soleil, et $\frac{1}{n}$ la fraction de l'espace entourant le corps considéré, qu'intercepte le disque du Soleil. Or il résulte des mesures les plus récentes que la température absolue T du Soleil (définie comme étant celle que posséderait un corps noir ayant les dimensions du Soleil, et produisant le rayonnement de celui-ci), telle qu'on l'a déduite des mesures actinométriques, est comprise entre 5000° et 7000° . Nous considérerons, en prenant la moyenne de ce nombre, T comme égal à 6000° .

Dans ces conditions, étant donnée une particule coronale située à une distance du Soleil égale à deux rayons de cet astre (et l'extension des jets de la couronne ne dépasse guère cette distance, sauf lors du minimum des taches), on voit facilement que l'angle solide x sous-tendu de cette particule par le disque solaire est donné par l'équation :

$$3 \sin \frac{x}{2} = 1,$$

d'où l'on tire

$$x = 19^\circ = \frac{4\pi}{18,8}.$$

La quantité n de l'équation ⁽²⁾ est donc ici

$$n = 18,8$$

⁽¹⁾ NEWCOMB, *Popular Astronomy*, p. 259.

⁽²⁾ *Bulletin de la Soc. ast. de France*, 1897, p. 118-123.

et la loi de Stéphan donne

$$18,8 \tau^{\frac{1}{4}} = 6000^{\frac{1}{4}}$$

d'où $T = 2884^{\circ}$ absolus pour la température que prend la particule. En réalité tous les corps solides connus s'écartent un peu des propriétés du corps noir théorique, et nous ignorons jusqu'à quel point les particules de la couronne s'écartent de ces propriétés. Il n'en reste pas moins que le calcul précédent nous indique certainement *l'ordre de grandeur* de la température absolue des particules coronales situées à un diamètre de distance de la surface solaire; et (c'est là que nous voulions en venir) on voit que cet ordre de grandeur est énormément supérieur à la température nécessaire pour amener à l'incandescence tous les corps connus ⁽¹⁾.

Mais allons plus loin : lors du minimum des taches, les parties équatoriales de la couronne sont, comme nous l'avons vu, visibles parfois jusqu'à une distance égale à 4 ou 5 diamètres solaires. Soit donc une particule coronale située à 5 diamètres solaires du disque; on voit facilement qu'on a dans ce cas

$$11 \sin \frac{x}{2} = 1,$$

d'où

$$x = \frac{4\pi}{n} = \frac{4\pi}{72},$$

et avec la loi de Stéphan

$$\tau = 2065^{\circ} \text{ abs.}$$

Cette température, quoique légèrement inférieure à celle que nous avons trouvée précédemment, est encore incomparablement plus élevée que celle qui suffit à amener tous les corps à l'incandescence. De cette discussion, nous pouvons donc, semble-t-il, légitimement conclure : *L'incandescence des particules de la couronne est due au rayonnement solaire.*

Mais nous avons établi dans un Chapitre précédent que le rayonnement est plus intense les années de minimum que les années de maximum des taches ⁽²⁾. Il s'ensuit immédiatement les conséquences suivantes :

(1) Huggins avait déjà émis l'opinion qu'il doit en être ainsi, sans d'ailleurs traiter numériquement la question (*Astrophys. Journ.*, 12, 279).

(2) M. K. Schwarzschild a récemment (*Münchener Berichte*, 31, 1901, S. 293-338) discuté le problème de la pression de radiation pour des sphères très petites parfaitement réfléchissantes. Il résulte de ses calculs que la pression de radiation est figurée en fonction du rayon des sphères par une courbe qui, pour un diamètre des sphères égal à environ un tiers de la longueur d'onde, a un maximum : pour des sphères plus petites la pression diminue très rapidement et devient négligeable.

Il s'ensuit que le rayonnement hertzien du Soleil ne doit exercer qu'une pression négligeable sur les particules de la couronne solaire dont le diamètre doit être, comme nous l'avons vu, de l'ordre du dix millième de millimètre, c'est-à-dire bien inférieur à la longueur d'onde des ondes hertziennes les plus petites que l'on connaisse.

1° *Les rayons coronaux doivent être visibles sur une plus grande étendue les années de minimum que les années de maximum des taches; toutes choses égales d'ailleurs, cette différence entre leur extension aux deux époques doit affecter principalement les rayons qui sont au-dessous de la zone des taches, c'est-à-dire près des régions équatoriales du Soleil* (puisque la variation du rayonnement solaire entre diverses époques est due à la fréquence plus ou moins grande des taches).

2° *Le spectre continu de la couronne doit être plus intense les années de minimum que les années de maximum des taches.*

Or, ces deux propositions représentent exactement les phénomènes tels qu'ils ont été invariablement observés [voir ci-dessus (§ I)].

3° Nous avons vu que, outre leur lumière propre, les particules coronales réfléchissent une certaine quantité de la lumière à raies noires du disque, et que celle-ci n'est facilement observable que dans les parties les plus extérieures de la couronne; on conçoit fort bien qu'il doive en être ainsi, car la lumière propre des particules donne un spectre continu, qui constitue un fond lumineux sur lequel les raies noires de Fraunhofer ne peuvent se détacher d'une manière visible que si ce fond est suffisamment faible, c'est-à-dire dans les parties les plus extérieures de la couronne; il est vrai que la quantité de lumière diffusée diminue elle-même en même temps que la lumière propre des particules lorsqu'on s'éloigne du disque, mais on sait que l'œil est beaucoup plus apte à apprécier une différence d'éclat donnée entre deux lumières faibles qu'entre deux lumières plus intenses, et il en est de même pour la plaque photographique. Or, comme le rayonnement du Soleil, et par suite la distance du disque à laquelle les particules ont une lumière propre d'une certaine intensité, sont moindres les années de maxima des taches que les années de minima, il doit s'ensuivre que, si cette distance est l lors d'un maximum des taches et $(l + d)$ lors d'un minimum, toutes choses égales d'ailleurs, les quantités de lumière réfléchie que nous recevons des particules seront entre elles comme $\frac{1}{l^2}$ et $\frac{1}{(l + d)^2}$ ⁽¹⁾; c'est-à-dire que les raies de Fraunhofer de la lumière solaire réfléchie par la couronne doivent être beaucoup plus facilement visibles les années de maxima que les années de minima des taches.

Or, c'est exactement ce qu'ont montré toutes les observations. En effet, tandis qu'en 1871, 1882, 1893 (années de maxima des taches) un grand nombre de raies fraunhoferiennes de la couronne ont pu être observées et même photo-

(1) En effet, les quantités de lumière reçues du Soleil par les particules dans les deux cas sont entre elles comme $\frac{1}{l^2}$ et $\frac{1}{(l + d)^2}$; donc les quantités de cette lumière, réfléchie par les particules, qui nous arrive, sont entre elles comme les carrés de ces nombres, c'est-à-dire comme $\frac{1}{l^4}$ et $\frac{1}{(l + d)^4}$.

graphiées par MM. Janssen, Schuster, de la Baume Pluvinel, etc., aucun observateur n'a pu nettement constater leur présence lors des éclipses qui ont eu lieu au moment du minimum des taches, lors de la récente éclipse de 1900 ⁽¹⁾, par exemple.

Il semble donc que nous puissions considérer comme à peu près résolus ces premiers problèmes que constituaient : les variations d'étendue et d'éclat des filaments coronaux, et les changements périodiques des intensités respectives du spectre continu et du spectre fraunhoferien que ces filaments émettent.

Si maintenant nous tournons notre attention vers la structure si spéciale et les conditions d'équilibre de cette partie de la couronne, la question, malgré son apparente complexité, ne sera peut-être pas inabordable, grâce aux données obtenues ci-dessus, et à l'application de quelques principes simples empruntés à la mécanique céleste :

L'observation a montré que les formes des banderoles coronales lors des éclipses demeurent absolument immobiles pendant toute la totalité. En 1883, par exemple, M. Janssen a observé que « les formes de la couronne ont été absolument fixes pendant toute la durée de la totalité » ⁽²⁾. Young, d'autre part, dit : « L'impression ordinaire produite sur l'esprit par la couronne est celle d'une immobilité calme et sereine » ⁽³⁾. Enfin les photographies prises pendant les éclipses, à plusieurs heures de distance, dans des stations séparées par des milliers de kilomètres, sont absolument d'accord ⁽⁴⁾, et montrent, comme dit Young, que « les principaux traits de la couronne persistent pendant des heures au moins », malgré l'état d'agitation perpétuelle de la photosphère que montrent si bien les belles photographies du Soleil prises à Meudon, et sur lesquelles les granulations de la photosphère ne sont jamais disposées identiquement à quelques minutes seulement d'intervalle. Il s'ensuit que *les banderoles coronales sont constituées en majeure partie par des particules qui flottent en quelque sorte et dont la pesanteur est, à très peu près, balancée par la répulsion de Maxwell-Bartoli.*

Considérons d'abord le Soleil à l'époque du minimum d'activité, c'est-à-dire au moment où toutes les parties de sa surface, les régions équatoriales comme les régions polaires, sont dans un état, sensiblement uniforme, de calme relatif. Nous avons vu (voir ci-dessus, I, 4°) quels sont les caractères toujours identiques des couronnes observées les années de minima (1867, 1878, 1889, 1900). Le dessin ci-dessous, fait d'après les photographies prises pendant l'éclipse

⁽¹⁾ Voir, *Comptes rendus* 1901, t. CXXXII, p. 1259-1266, les Observations de M. de la Baume Pluvinel à ce sujet.

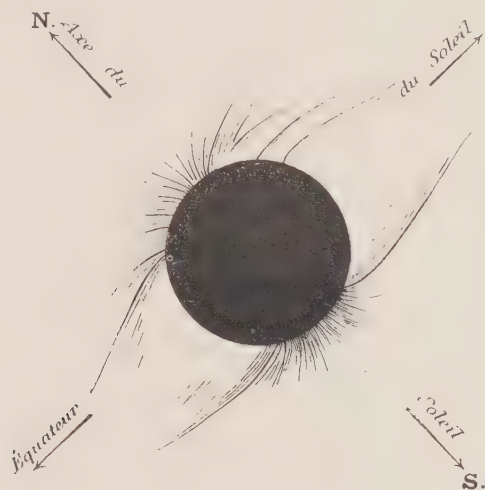
⁽²⁾ *Annuaire du Bureau des longitudes*, 1884, p. 859.

⁽³⁾ *Le Soleil*, p. 191-192.

⁽⁴⁾ HUGGINS, *Proceedings of the Royal Society*, t. XXXIX, p. 119-120; DESLANDRES, *loc. cit.*, C. 16, etc.

de 1878 (¹), par exemple, représente schématiquement, mais aussi fidèlement que possible, la structure des rayons coronaux sur ces photographies, et il suffit de jeter un coup d'œil sur les photographies des couronnes de 1867, 1889 et 1900, pour s'assurer que la forme générale en est identiquement semblable (*fig. 3*).

Fig. 3.



Structure de la couronne solaire lors d'un minimum des taches. — 1878.

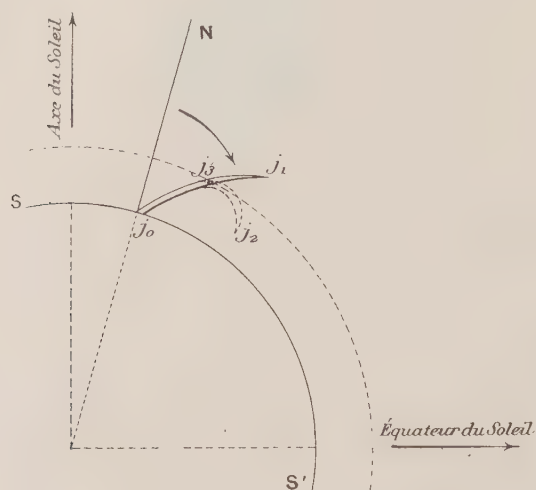
Le premier fait qui frappe est l'incurvation caractéristique des jets coronaux, accentuée surtout dans les régions polaires. Cette incurvation peut-elle être due, comme on l'a pensé, aux particules les plus pesantes qui retombent sur le Soleil? Il semble que non; en effet :

1° La pesanteur d'une particule située au-dessus du Soleil est dirigée suivant la normale à la surface solaire qui passe par cette particule; si, d'autre part, il existe des causes perturbatrices (courants atmosphériques, etc.) telles que celles qui font que les gouttelettes d'un jet d'eau forment des trajectoires incurvées, les trajectoires devront être comme dans le cas d'un jet d'eau disposées en moyenne dans toutes les directions et orientées dans des azimuts quelconques autour de cette normale. Or, on ne constate rien de pareil sur le Soleil : les trajectoires des jets coronaux sont toujours inclinées vers l'équateur solaire, autrement dit, l'angle que forme avec la direction de l'équateur une portion quelconque d'un jet coronal est toujours plus petit que l'angle formé avec l'équateur par la normale à la surface solaire menée à la base du jet coronal considéré.

(¹) *Reports on the total solar eclipse of July, 29, 1878; by the U. S. naval observatory*, pl. 19, 20 et 21.

2° Si la force qui produit l'incurvation des jets coronaux était la pesanteur des particules, les jets devraient fréquemment affecter la forme $j_0 j_3 j_2$ (fig. 4), c'est-à-dire que l'extrémité du jet devrait être dirigée vers la surface solaire, comme en j_2 . Or, sur aucune des photographies de la couronne prises les années de minima des taches, nous n'avons pu trouver *un seul exemple* de jets dirigés de cette manière. Et cela est d'autant plus concluant que, si de pareils jets existaient, les particules situées en j_2 , étant plus rapprochées de la surface SS du Soleil que celles situées en j_3 , et comme telles portées à une incandescence plus vive, devraient être beaucoup mieux visibles que la partie j_3 et presque

Fig. 4.



aussi lumineuses que la base j_0 du jet. Au contraire, sur toutes les photographies la courbure des jets est invariablement semblable à $j_0 j_3 j_1$, c'est-à-dire qu'un élément quelconque des jets, aussi loin qu'on peut le suivre, et jusqu'à leurs extrémités, fait toujours un angle plus petit que 90° avec la normale à SS' menée de cet élément (les angles étant comptés de 0° à 180° dans le sens de la flèche à partir de cette normale), *contrairement à ce qu'on devrait observer si l'incurvation des rayons coronaux était due à la chute des particules sur le Soleil.*

La force qui produit cette incurvation n'est donc pas la pesanteur, et il faut chercher autre chose.

Or, si les particularités de la structure coronale ne peuvent être dues à une force dirigée, comme la pesanteur, normalement à la surface solaire, il semble qu'elles s'expliqueraient toutes, et immédiatement, par l'existence d'une force qui tendrait à amener vers le plan équatorial solaire les particules en suspension au-dessus de la photosphère. En effet, toutes les particularités des jets coronaux que nous venons de passer en revue, leurs courbures caractéristiques d'autant

plus accentuées que l'on se rapproche des pôles et symétriquement par rapport à ceux-ci, l'extension extraordinaire des rayons équatoriaux, impliquent *irré- sistiblement* l'existence d'une pareille force.

Et nous allons essayer de montrer maintenant que les particules en suspension au-dessus du Soleil par l'effet de la pression de radiation, *peuvent* et *doivent* effectivement être soumises à une force de ce genre.

Laplace, dans son exposition du système du monde, a montré que, dans la contraction de la nébuleuse solaire primitive autour de son noyau, la limite où la force centrifuge et la force d'attraction des molécules étaient égales, a dû se rapprocher peu à peu du centre, et que les molécules abandonnées au delà de cette limite ont dû s'accumuler vers les régions équatoriales en donnant à la nébuleuse la forme annulaire qui est visible encore aujourd'hui dans les anneaux de Saturne. Voici comment Newcomb s'exprime à ce sujet : « La nébuleuse solaire devait avoir au début une forme à très peu près sphérique. A mesure qu'elle s'est contractée, l'effet de la force centrifuge a été plus marqué. Lorsque enfin la contraction a été assez avancée pour que la force centrifuge et la force d'attraction se fissent à peu près équilibre à la limite équatoriale extérieure, le résultat a dû être que la contraction dans la direction de l'équateur a entièrement cessé et s'est confinée dans les régions polaires *d'où chaque particule tombait, non vers le centre, mais vers le plan de l'équateur solaire...* ».

Avant Laplace, Kant, après lui tous ceux qui ont abordé le problème cosmogonique, Faye, Wolf, etc..., ont émis sur ce point des idées identiques. Mais ces idées n'ont pris une forme précise, mathématique, que grâce aux travaux de M. Roche.

M. Roche, dans l'hypothèse que la nébuleuse primitive possédait un noyau central dont l'attraction l'emporte énormément sur celle de son atmosphère, a établi les équations des surfaces de niveau de celle-ci. Il en résulte que ces surfaces de niveau possèdent une forme lenticulaire, et d'autant plus aplatie que l'on s'éloigne du centre; que d'autre part, à une certaine distance du centre, il existe une *surface limite* de niveau s_1 , de rayon équatorial R , fermée, et telle que la surface de niveau qui la suit vers l'extérieur, s_2 , l'enveloppe et en diffère infiniment peu jusque dans le voisinage de l'équateur; mais au lieu de couper celui-ci, comme les surfaces intérieures, elle s'arrête avant de l'atteindre, devient tangente aux rayons partant du centre, et s'éloigne ensuite indéfiniment de part et d'autre (*fig. 5*). Le rayon équatorial de la surface limite satisfait à l'équation

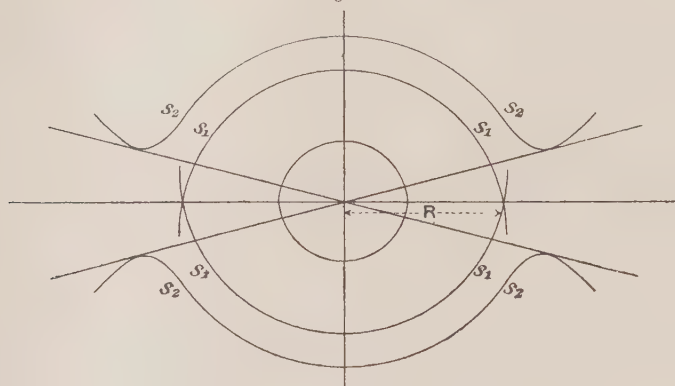
$$R \propto \alpha^{-\frac{1}{3}},$$

où α est le rapport de la composante verticale de la force centrifuge à la pesanteur, à l'unité de distance et à l'équateur. Si α vient à augmenter, par suite, par

exemple, d'une augmentation de la vitesse angulaire, R diminue, et, comme le montre M. Roche, le fluide atmosphérique ayant dépassé la surface libre limite s'écoule des régions polaires dans le plan de l'équateur par les ouvertures que présente dans cette région la surface de niveau s_2 .

Or il semble que nous pouvons légitimement transporter ces notions dans l'étude des essaims de particules en suspension autour du soleil, et qui constituent les filaments de la Couronne. Rappelons en effet que M. Roche a montré ⁽¹⁾

Fig. 5.



que les notions que nous venons d'examiner s'appliquent parfaitement à l'atmosphère gazeuse actuelle du Soleil. (Cela résulte du fait que, dans le cas de l'atmosphère du Soleil, l'hypothèse sur laquelle est basé le calcul de M. Roche, à savoir que l'attraction du noyau l'emporte énormément sur celle de l'atmosphère, est *effectivement* réalisée ici.) Il nous suffira donc, pour pouvoir appliquer ces notions aux filaments de particules incandescentes de la couronne, de montrer que les particules flottantes qui constituent ces filaments peuvent être, sans erreur sensible, assimilées, par leurs propriétés mécaniques, à des molécules gazeuses atmosphériques.

Pour établir les équations des couches de niveau, M. Roche a défini ces molécules atmosphériques par les deux conditions suivantes : *l'attraction des molécules les plus voisines sur une molécule donnée est négligeable par rapport à l'attraction de l'astre central; les molécules atmosphériques participent au mouvement de rotation de l'astre.*

Or, nous allons voir que ces deux conditions sont précisément réalisées dans le cas des particules constituant les filaments coronaux; en effet :

1° Nous pouvons, de la manière suivante, calculer l'ordre de grandeur de l'attraction exercée sur une particule coronale par les particules les plus voisines. Pour cela, il faut connaître d'abord la distance moyenne des particules

(1) RESAL, *Mécanique céleste*, passim.

coronales entre elles; voici comment on peut calculer approximativement cette donnée :

Des mesures photométriques soignées de l'éclat de la couronne solaire ont été faites par Langley, qui a trouvé ⁽¹⁾ qu'à 3' du bord solaire l'éclat *apparent* de la couronne ne dépasse pas $\frac{1}{10}$ de celui de la pleine Lune et qu'il diminue à mesure qu'on s'éloigne du disque. Abney est arrivé à des résultats analogues ⁽²⁾.

Soient l la distance de la Terre à la Lune, L la distance de la Terre au Soleil. La quantité de lumière solaire réfléchie que nous recevons de la pleine Lune est, par unité de surface de celle-ci, proportionnelle à

$$\frac{1}{L^2 l^2}$$

la quantité de lumière solaire réfléchie qui nous vient des particules de la couronne solaire situées à 3' du limbe est ⁽³⁾, par unité de surface réfléchissante des particules (et en supposant le pouvoir réflecteur de celles-ci voisin de celui de la Lune, ce qui, dans ce calcul approximatif, n'a qu'une influence négligeable sur l'ordre de grandeur du résultat), proportionnelle à

$$\frac{1}{9} \frac{l^2}{L^2}$$

Si, au lieu de comparer les quantités de lumière réfléchie par unité *réelle* de surface de la Lune et de la Couronne, on compare les quantités de lumière réfléchie que nous recevons par unité de surface *angulaire* (c'est-à-dire *apparente*) de la Lune et de la partie de la Couronne considérée, on voit, en tenant compte des distances, que celle-là est à celle-ci comme

$$\frac{1}{l^2 L^2} \text{ est à } \frac{1}{\frac{l^2}{9} L^2} < \frac{L^2}{l^2}.$$

Si s désigne la portion de la surface d'une particule coronale sphérique qui réfléchit vers la Terre la lumière de la photosphère, et si Σs désigne la somme de ces surfaces réfléchissantes pour toutes les particules situées dans l'unité de surface angulaire de la couronne, on voit qu'on peut écrire, en tenant compte du résultat de Langley (*voir* ci-dessus) et en admettant que toute la lumière que nous recevons de la Couronne est de la lumière photosphérique réfléchie (ce qui est loin d'être exact, car nous avons rappelé, au début de ce Chapitre,

⁽¹⁾ *Proceed. Roy. Soc.*, t. XXXIX, p. 110.

⁽²⁾ *Philos. Transact.*, A, 1889, p. 381.

⁽³⁾ 3' égale ici sensiblement $\frac{l}{3}$.

que la lumière réfléchie n'est qu'une faible portion de la lumière coronale; cette inexactitude volontaire nous donnera une valeur *trop grande* de l'attraction mutuelle des particules, et nos conclusions en seront fortifiées *a fortiori*), l'équation suivante

$$\frac{1}{l^2 L^2} = 10 \times \frac{1}{l^2} \times \frac{L^2}{9} \times \Sigma s,$$

d'où sensiblement

$$\Sigma s = \frac{l^2 \cdot 10^{-2}}{L^2}.$$

Or, on sait que $\frac{l}{L}$ (rapport des distances de la Terre à la Lune et de la Lune au Soleil) est égal à $2,5 \times 10^{-3}$ ⁽¹⁾.

Donc

$$\Sigma s = 6,2 \times 10^{-8}.$$

Parmi les particules coronales, les unes sont situées en deçà du plan perpendiculaire au rayon visuel qui passe par le centre du Soleil et d'autres sont au delà de ce plan, mais toutes, par l'effet de la perspective, paraissent se projeter sur lui; si l'on considère une particule située dans ce plan et dont le rayon est ρ , la portion de sa surface éclairée par le Soleil et qui nous renvoie sa lumière réfléchie est sensiblement, si on la projette sur ce plan, égale à $\frac{\pi \rho^2}{2}$.

D'autre part sa surface totale projetée sur ce plan est égale à $\pi \rho^2$.

Donc la somme des surfaces totales des particules projetées sur ce plan par unité de surface est

$$2 \Sigma s = 1,2 \times 10^{-7}.$$

Supposons que toutes ces particules qui, dans la région de la couronne considérée, se projettent pour nous, par l'effet de la perspective, dans ce plan, s'y trouvent réellement. (Ceci est certainement inexact, mais nous exagérons à dessein dans ce calcul toutes les circonstances destinées à donner une valeur trop forte de l'attraction mutuelle de particules coronales; nos conclusions n'en seront que fortifiées.)

Or, la distance moyenne des particules voisines λ , est donnée dans ce cas par l'équation (voir *Théorie cinétique*, Meyer)

$$\lambda^2 = \frac{2s}{2 \Sigma s} = \frac{\pi \rho^2}{1,2 \times 10^{-7}}.$$

Mais, ainsi qu'Arrhénius l'a calculé ⁽²⁾, la valeur de ρ qui correspond à une

(1) *Annuaire du Bureau des Longitudes*.

(2) *Loc. cit.*

répulsion de radiation égale à la pesanteur (ce qui est, comme nous l'avons montré, le cas des particules coronales) est voisine de 1^u (pour une densité voisine de 1, mais il est facile de voir qu'une densité différente ne changerait pas l'ordre de grandeur du résultat de ce calcul).

Donc, en C. G. S. :

$$\lambda^2 = 26,$$

et

$$\lambda = 5^{\text{cm}}, 1. \text{ environ.}$$

D'autre part, la masse d'une particule étant environ

$$\frac{4}{3} \pi \rho^3 = 4 \times 10^{-9} \text{ sensiblement,}$$

et l'attraction étant proportionnelle à la masse et à l'inverse du carré de la distance, il s'ensuit que l'attraction exercée par une particule sur les particules les plus voisines est proportionnelle à

$$\frac{m}{\lambda^2} = 1,5 \times 10^{-10}.$$

Calculons la valeur de ce rapport dans le cas non plus de l'attraction d'une particule mais de celle du Soleil; la masse du Soleil est environ 2.10^{33} grammes.

La distance à son centre, d'une particule située à $3'$ du limbe, est environ 8.10^{10} centimètres.

Son attraction sur cette particule est donc proportionnelle à

$$\frac{2.10^{33}}{(8.10^{10})^2} = 3.10^{11},$$

c'est-à-dire qu'elle est 2×10^{21} fois plus grande que l'attraction exercée par les particules voisines. Si même on considère des portions de la Couronne situées à des distances beaucoup plus grandes du disque, on voit facilement que l'attraction du Soleil ne cessera pas d'être infiniment plus grande que celle des particules voisines.

Donc : *l'attraction mutuelle des particules coronales est absolument négligeable par rapport à celle qu'exerce sur elles le Soleil.*

2° On voit facilement que, les particules coronales en suspension au-dessus de la photosphère devant participer à la rotation du Soleil, par suite des frottements réciproques que les diverses couches de la partie gazeuse de la Couronne exercent entre elles, et contre la photosphère, cette atmosphère gazeuse doit suivre dans son mouvement de rotation le Soleil. En fait, M. Deslandres a, en effet, en 1893, montré par l'étude des vitesses radiales de la raie du *coronium* que la Couronne participe à la rotation solaire. Si les résultats *numériques* de

M. Deslandres, qui tendent à attribuer à la Couronne une durée de révolution égale à celle du Soleil, demandent confirmation, il n'en demeure pas moins que, *qualitativement*, il est certain que la Couronne gazeuse tourne dans le même sens que le Soleil. Or les particules incandescentes qui flottent au-dessus de la photosphère, au sein de l'atmosphère coronale gazeuse, doivent être entraînées par celle-ci dans son mouvement de rotation de la même manière que, dans notre atmosphère, les nuages, lorsqu'il n'y a pas de vent, sont entraînés dans le sens de la rotation de la Terre (et cela d'autant plus facilement que les particules coronales, vu leur petitesse, offrent une grande surface relativement à leur masse). Nous pouvons donc énoncer que : *les particules coronales tournent autour du Soleil*. Quant à la vitesse réelle de cette rotation, elle n'a pas besoin d'être connue pour que les raisonnements que nous allons faire soient exacts; il suffit, en effet, comme le montre l'examen des équations de Roche, et comme nous allons le voir, que cette vitesse ne soit pas nulle (ce que nous venons d'établir) pour que ces raisonnements subsistent intégralement.

Les deux conditions auxquelles M. Roche a assujetti les molécules atmosphériques sont donc réalisées dans le cas des essaims de particules incandescentes de la couronne, et *les équations des couches de niveau atmosphériques établies par lui sont applicables à ces particules* ⁽¹⁾.

Nous avons montré précédemment que les banderoles coronales sont constituées en majeure partie par les particules dont la pesanteur est à très peu près balancée par la répulsion de Maxwell-Bartoli, et nous avons déduit ce fait (voir ci-dessus) de l'immobilité des formes coronales pendant toute la durée des éclipses. On pouvait en quelque sorte prévoir *a priori* ce résultat : en effet, parmi les particules projetées au-dessus de la photosphère, celles dont la pesanteur dépasse notablement la répulsion de radiation doivent rapidement retomber à la surface; celles au contraire dont la surface est telle que la pression de radiation dépasse de beaucoup leur pesanteur doivent s'éloigner très rapidement des environs du soleil; donc, seules les particules dont la pesanteur est voisine de la pression de Maxwell-Bartoli peuvent demeurer au-dessus de la surface solaire et s'y accumuler en grand nombre, et tout ceci nous conduit de nouveau à la conclusion que *les filaments de la Couronne sont formés surtout de particules dont la pesanteur balance à peu près la répulsion due au rayonnement*.

Or, d'après les calculs de M. Roche, un essaim de particules doit s'écouler des pôles vers l'équateur dès qu'il a dépassé la *surface limite* définie plus haut,

(1) Les équations de M. Roche (voir RESAL, *loc. cit.*) montrent, en effet, que, quelle que soit la valeur de α (définie plus haut), les couches de niveau ne cessent pas de rester semblables à elles-mêmes; elles se rapprochent ou s'éloignent seulement plus ou moins du centre, selon la valeur de α , sans que leur forme diffère.

et où la pesanteur est exactement balancée par la composante verticale de la force centrifuge. Toute cause qui diminue la pesanteur diminue le rayon de cette surface limite et rapproche celle-ci du soleil; comme les particules coronales flottant au-dessus de la photosphère ont, ainsi que nous venons de le voir, leur pesanteur sensiblement annulée par la répulsion de Maxwell-Bartoli, il s'ensuit que *cette surface limite* (qui devrait, si cette répulsion n'existait pas, se trouver, comme le montre le calcul, à une distance du soleil égale à 36 rayons de cet astre) ⁽¹⁾ *se confond avec la photosphère elle-même du Soleil.*

Donc les particules incandescentes de la Couronne, projetées par les mouvements de la photosphère au-dessus de celle-ci, doivent s'écouler des régions polaires vers l'équateur et s'y accumuler. Ce mouvement des particules vers l'équateur doit être d'ailleurs d'autant plus marqué, qu'elles sont plus éloignées de la photosphère, car les mouvements éruptifs de celle-ci tendent à leur donner une direction qui lui est normale. Il s'ensuit que *les essaims de particules coronales doivent affecter la forme de rayons courbes dont la concavité est dirigée vers l'équateur solaire, et que la courbure de ces rayons doit avoir précisément les caractères que nous avons reconnus sur les photographies coronales. Il s'ensuit également que les rayons de la Couronne doivent être d'autant plus étendus que l'on s'éloigne davantage des pôles du soleil, et que vers l'équateur ils doivent avoir une très grande extension, car, au voisinage du plan équatorial, les surfaces de niveaux s'ouvrent en deux nappes indéfinies.*

Toutes ces conséquences de notre théorie sont bien conformes aux faits, et il semble que les particularités essentielles de la structure et de la lumière des formes coronales se trouvent ainsi simplement expliquées.

Si de la considération de la structure de la Couronne aux époques de minima des taches (qui peut être considérée comme la forme d'équilibre normale de la Couronne), nous passons à celle de la Couronne aux époques de maxima, les conséquences de notre conception ne semblent pas moins justifiées par les faits. Nous l'avons déjà montré en ce qui concerne les variations de l'éclat et de l'étendue des diverses parties et des diverses lumières qu'elles émettent, parallèles aux variations de l'activité solaire (*voir* ci-dessus). En ce qui concerne la structure des banderoles coronales, voici ce qui doit se passer: tandis que lors du minimum des taches, toutes les parties de la surface solaire sont dans un état uniforme de calme relatif (comme le montre notamment l'étude photographique des granulations), et rayonnent la même quantité de chaleur et de lumière, ce qui a

(1) RESAL, *Mécanique céleste*. Cette distance, calculée par Roche, serait évidemment plus grande si la durée de rotation des particules autour du Soleil était inférieure à celle de l'astre central; mais, dans le cas qui nous occupe, on voit immédiatement que, quelle que soit cette vitesse de rotation, et pourvu qu'elle ne soit pas nulle (ce que nous avons établi ci-dessus), la surface limite se confond ici avec la photosphère.

nécessairement pour effet de permettre aux forces qui donnent à la Couronne sa forme normale, de se manifester régulièrement et à l'abri des causes perturbatrices, au contraire, lors du maximum des taches, les régions voisines de l'équateur solaire émettent moins de chaleur que les régions polaires et sont dans un état continuuel d'agitation violente et irrégulière; il doit, par suite, se produire au-dessus de la photosphère des courants de convection eux-mêmes très puissants et irréguliers, dont la direction et la force doivent dépendre surtout de circonstances accidentelles et locales. Les essaims de particules coronales qui flottent au-dessus de la photosphère sont les jouets de cette agitation continuelle qui peut masquer complètement l'effet régulier des forces que nous avons étudiées ci-dessus, et les formes coronales normales doivent en être considérablement affectées. Donc, tandis que les Couronnes des années de minima se ramènent toutes à un type unique, celles des années de maxima, tout en présentant encore une forme générale analogue, doivent présenter entre elles de nombreuses différences d'aspects; ces différences doivent avoir un caractère accidentel, c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas se reproduire d'une manière identique dans deux Couronnes différentes, et que dans une même Couronne elles doivent avoir une apparence dénuée de toute symétrie.

Or tous ces caractères sont point pour point ceux que l'expérience a révélés.

Il semble en définitive que la conception que nous venons d'esquisser échappe à la plupart des objections soulevées par des théories précédentes, et coordonne simplement les faits d'observation connus au sujet des rayons de la Couronne.

B. L'incandescence de la partie gazeuse de la Couronne solaire doit, semble-t-il, être attribuée à une origine électrique; cela résulte, en particulier, de ce fait que son spectre contient les raies de l'hydrogène, et que l'on n'a pu obtenir expérimentalement ces raies caractéristiques que par une action électrique, bien que l'hydrogène ait été traité depuis longtemps de toutes les manières et notamment par la combustion. D'ailleurs, les plus récentes recherches sur l'émission des gaz ont montré que, aux plus hautes températures que l'on ait pu réaliser dans les laboratoires, la chaleur seule est incapable de faire émettre aux gaz un spectre de raies ⁽¹⁾. D'autre part, le calcul nous a montré (*voir* ci-dessus) que la température qui doit régner dans les régions extérieures et moyennes de la Couronne est du même ordre de grandeur que les hautes températures auxquelles divers observateurs, et notamment Werner Siemens, ont soumis expérimentalement des gaz sans que ceux-ci émettent la moindre lumière ⁽²⁾. Enfin il résulte de l'observation (*voir* ci-dessus, 3°) que la partie gazeuse de la Couronne émet

⁽¹⁾ *Rapports du Congrès de Physique*, 1900, t. II; E. PRINGSHEIM, *Sur l'émission des gaz*, passim.

⁽²⁾ *Loc. cit.*

des raies dont l'étendue et l'éclat sont maxima précisément lors des maxima de l'activité solaire, c'est-à-dire lorsque cet astre rayonne le moins de chaleur, comme cela a été établi au Chapitre II.

La considération du rayonnement hertzien du Soleil explique au contraire, simplement, à la fois l'origine de l'incandescence de la partie gazeuse de la Couronne, et les variations si caractéristiques de son étendue et de son éclat, qui sont, comme nous l'avons rappelé (*voir ci-dessus, 5°*) exactement inverses de celles des rayons coronaux : *L'illumination des gaz raréfiés de la Couronne étant due aux ondes hertziennes émancées du Soleil conformément aux propriétés connues de ces ondes, il s'ensuit que le spectre gazeux de la Couronne doit avoir sa plus grande étendue et son plus grand éclat lors du maximum des taches* (puisque, ainsi que cela a été établi plus haut, l'émission des ondes hertziennes solaires a précisément sa plus grande intensité à ce moment). Or c'est bien ce que l'observation a depuis longtemps montré, comme nous l'avons rappelé au début de ce Chapitre.

Certes, en dehors de l'origine de l'incandescence gazeuse de la Couronne, et de ses variations parallèles à celle de l'activité solaire, d'autres problèmes encore se sont posés, relativement à l'état d'équilibre de cette atmosphère gazeuse; plusieurs astronomes, et notamment Huggins (¹), ont fait observer que s'il s'agissait là d'une atmosphère véritable, s'étendant, comme il résulte de l'observation, à plusieurs centaines de mille kilomètres au-dessus de la photosphère, et dont les couches pèseraient les unes sur les autres, comme celles de l'atmosphère terrestre, il s'ensuivrait nécessairement que, même en attribuant au coronium une densité beaucoup plus faible que celle de l'hydrogène, la densité des couches inférieures d'une pareille atmosphère devrait être comparable à celle des métaux, et que la pression relativement faible des gaz coronaux, qui est indiquée par la finesse absolue de leurs raies spectrales jusqu'au voisinage immédiat du soleil, paraissait inconciliable avec ce fait. Pour trancher cette difficulté, Huggins pensait que la Couronne gazeuse est constituée, non pas par une atmosphère continue et homogène autour du Soleil, mais par une multitude de petites atmosphères liées à chacune des particules solides ou liquides des rayons coronaux. Mais l'observation a établi depuis (*voir ci-dessus, 5°*) qu'il n'y a aucune relation entre la partie gazeuse de la Couronne et les filaments de particules incandescentes, et que non seulement leurs structures respectives et leurs étendues sont indépendantes et entièrement différentes, mais même que les phases et les caractères de leurs variations périodiques, loin d'être parallèles, sont exactement inverses. Les faits se sont donc montrés inconciliables avec l'explication de Huggins.

(¹) *Loc. cit.*

N.

D'un autre côté, il semble que, depuis quelques années, et grâce à l'introduction de la théorie cinétique des gaz dans l'étude de l'atmosphère des astres, on a fait de grands pas vers la solution complète de ce problème : au lieu de considérer, comme on le faisait jusqu'à ces dernières années, les molécules gazeuses d'une atmosphère comme inertes et animées seulement des mouvements qui résultent de leur gravitation autour de l'astre central, si l'on considère au contraire, conformément à la théorie cinétique des gaz, ces molécules comme animées de mouvements dans toutes les directions et avec toutes les vitesses possibles, les résultats changent complètement. La théorie indique en effet qu'il existe pour chaque gaz une certaine vitesse la plus probable (c'est-à-dire une vitesse peu différente des vitesses de la plus grande partie des molécules) dépendant uniquement de la température et du poids atomique du gaz.

D'autre part, on montre en Mécanique que si la vitesse d'un point matériel soumis à l'attraction d'un astre dépasse $\sqrt{2ag_0}$ (où a est le rayon de l'astre et g_0 l'accélération de la gravité à sa surface), ce point décrit une parabole ou une hyperbole et, après avoir approché la surface de l'astre, s'en éloigne indéfiniment sans y revenir jamais. Donc, si la vitesse la plus probable des molécules d'un gaz donné, dans l'atmosphère d'un astre, est voisine de $\sqrt{2ag_0}$, ce gaz ne peut pas être retenu à la surface de cet astre. Plusieurs auteurs, et notamment M. J.-J. Stoney ⁽¹⁾ et M. Rogovsky ⁽²⁾, ont développé ces notions et fait des applications numériques des formules de la théorie cinétique des gaz à l'étude des atmosphères planétaire et solaire. Les chiffres qu'ils ont obtenus respectivement diffèrent assez les uns des autres, ce qui tient sans doute à la fois à l'incertitude de certaines formules de la théorie cinétique des gaz et au peu de certitude des données que l'on possède sur les températures des astres du système solaire. Aussi il pourrait paraître prématuré de considérer comme définitifs les résultats *numériques* de ces savants. Néanmoins leurs calculs ont mis hors de doute ⁽³⁾ que, plus le poids atomique d'un gaz de l'atmosphère solaire est faible, moins sa densité doit varier rapidement à mesure qu'on s'élève au-dessus du Soleil et que, tandis que les gaz les plus lourds sont plus condensés à la surface de l'astre, les plus légers doivent au contraire exister en plus grande quantité dans les parties supérieures de l'atmosphère ; ils ont établi également que les gaz, pour n'être plus soumis à la pesanteur sur le Soleil, doivent avoir une densité peu différente de celle de l'hydrogène à la surface même de

(1) *Astrophysical Journal*, t. VII, 1898, p. 25-55.

(2) *Id.*, t. XIV, 1901, p. 234-260.

(3) *Id.*, t. XIV, 1901, p. 237.

l'astre, et à une certaine distance de celle-ci (où règne une température bien moins élevée) doivent avoir une densité bien plus faible (1).

C'est grâce à ces notions nouvelles et fécondes que l'on a expliqué l'absence presque totale de l'hydrogène et de l'hélium dans notre atmosphère; il n'est pas douteux, semble-t-il, que grâce à elles également le problème de l'équilibre de la portion gazeuse de la couronne pourra être résolu, et qu'on expliquera ainsi comment la pression relativement peu élevée qui règne dans les parties basses de l'atmosphère solaire se concilie avec l'épaisseur énorme de celle-ci. Mais il serait prématuré de faire ce calcul tant qu'on ne connaîtra pas la densité du *coronium* et qu'on n'aura pas des données suffisamment précises sur la température effective des diverses parties de l'atmosphère solaire.

Quoi qu'il en soit, les considérations développées dans ce Chapitre n'auront peut-être pas été tout à fait inutiles, si elles ont pu apporter quelques éléments nouveaux de solution dans la question de l'origine de la luminescence de la Couronne gazeuse et de ses variations caractéristiques, et dans les problèmes qui se rattachent à la nature, aux variations et à la structure des rayons coronaux.

(1) Ainsi s'expliquerait le fait remarquable établi par l'observation, que la raie D_3 dans les protubérances, bien loin d'être plus large près du limbe solaire, devient plus fine vers le bas, et peut-être même ne touche pas le limbe du tout, ce qui indiquerait que l'hélium a une densité plus faible près du limbe que dans les couches plus élevées de l'atmosphère solaire (*Frost. Scheiner's astronomical Spectroscopy*, p. 189).



CHAPITRE IV.

SUR LES VARIATIONS PÉRIODIQUES ET LES PERTURBATIONS DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

Les observations faites dans les stations magnétiques terrestres du monde entier et qui se sont surtout systématisées depuis qu'on enregistre photographiquement les variations des éléments magnétiques ont mis nettement en évidence pour tous les éléments, et dans tous les lieux du Globe :

1° Une période diurne très nette (*solar diurnal variation*, comme disent les Anglais) dont les phases sont intimement liées avec la position du Soleil par rapport au méridien ;

2° Une variation annuelle de cette période diurne, l'amplitude de celle-ci étant bien plus grande en été qu'en hiver dans l'hémisphère Nord, et inversement dans l'hémisphère Sud ;

3° Une période de la variation diurne identique à celle des taches solaires, et telle, que l'amplitude diurne est plus grande lors du maximum que lors du minimum des taches ;

4° L'existence de jours et de périodes de perturbations magnétiques irrégulières et d'orages magnétiques, qui sont plus nombreux et d'une amplitude plus grande lors du maximum des taches solaires, étant relativement rares et peu importants vers l'époque du minimum des taches.

Dans l'étude de ces phénomènes qui va suivre, nous nous proposons de montrer que les propositions établies au Chapitre I permettent, semble-t-il, de jeter une clarté inattendue sur les circonstances qui produisent ces variations si complexes et si mystérieuses du magnétisme terrestre.

Dans une première Partie nous examinerons plus particulièrement ce qui concerne les variations régulières des éléments magnétiques, c'est-à-dire la période diurne et les variations annuelles et undécennales.

Dans une seconde Partie nous étudierons les variations irrégulières du magnétisme terrestre, c'est-à-dire les perturbations et les orages magnétiques.

Enfin dans une troisième Partie nous traiterons brièvement des effets produits sur le magnétisme terrestre par les éclipses de Soleil.

A. — Variations périodiques des éléments magnétiques.

I. *Variation diurne*. — Dans ce bref exposé de l'état actuel de la question nous ne suivrons pas, pour plus de clarté, l'ordre chronologique, et nous arriverons immédiatement aux travaux relativement récents de M. Arthur Schuster qui a le premier, semble-t-il, porté le problème sur son véritable terrain en appliquant, à l'exemple de Gauss, l'Analyse mathématique à l'étude de la période diurne.

En 1839, dans son célèbre Mémoire *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*, Gauss exprima le potentiel à la surface de la Terre en une série harmonique de 24 termes; il montra dans ce Mémoire que, si les composantes horizontales de la force magnétique étaient connues sur toute la surface de la Terre, on pourrait en déduire l'expression du potentiel sans qu'il soit nécessaire de connaître la composante verticale; et il montra comment la connaissance de cette dernière pouvait permettre de distinguer dans l'expression du potentiel les termes qui dépendent d'une cause extérieure de ceux qui dépendent d'une action intérieure à la surface de la Terre.

Dans un premier Mémoire (1) M. Arthur Schuster, après avoir montré que les variations diurnes de l'aiguille aimantée ne peuvent pas être dues à des courants verticaux circulant de la Terre à l'atmosphère à travers la surface du Globe (ce qui l'amène à conclure que l'aiguille aimantée n'est pas immergée dans le système de forces qui produit ses variations) entreprend de rechercher si ce système est au-dessus ou au-dessous de nous. Il rappelle, pour cela, que, puisque l'unité de pôle est assujettie à la condition de n'être pas immergée dans le système agissant sur elle, le potentiel V doit être soumis à la condition

$$\frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{d^2 V}{dy^2} + \frac{d^2 V}{dz^2} = 0,$$

ou à une condition équivalente dépendant du système de coordonnées employées. Il en déduit deux expressions possibles pour le potentiel, l'une dans l'hypothèse de causes situées au-dessus de nous et qui contient les puissances de la distance r au centre de la Terre en numérateur, l'autre dans l'hypothèse d'un système situé sous nos pieds et qui renferme les puissances de r en dénominateur. Or l'expression de la force verticale étant

$$Z = - \frac{dV}{dr},$$

le signe de cette expression sera évidemment différent selon que r se trouve dans

(1) *Philos. Magazine*, t. XXI, p. 349-359.

le dénominateur ou dans le numérateur du potentiel en question. Quelle est celle de ces deux expressions possibles de V qui concorde le mieux avec les résultats de l'observation? Tout d'abord, les deux expressions trouvées par M. Schuster ont leurs maxima et minima coïncidant dans le temps avec ceux de la composante horizontale Nord de la force qui produit la variation diurne (ce qui est parfaitement conforme à l'observation). Mais tandis que, dans l'hypothèse d'une force située au-dessus de nos têtes, $-\frac{dV}{dr}$ a son maximum et son minimum coïncidant avec le maximum et le minimum respectifs de la force horizontale dans les latitudes plus grandes que 45° , et son maximum coïncidant avec le minimum de la force horizontale dans les régions équatoriales, l'inverse doit avoir lieu dans l'hypothèse d'une force située sous nos pieds. Or les observations (celles notamment de Greenwich et de Bombay que M. Schuster prend comme exemple) montrent nettement que la première hypothèse est la vraie.

Cet important travail démontrait donc que les variations diurnes observées des éléments magnétiques concordent en direction et en phase avec celles qu'indique le calcul dans l'hypothèse que le champ qui les produit est extérieur à la surface terrestre.

Dans un second Mémoire ⁽¹⁾ M. Schuster reprit quantitativement l'étude de la question à l'aide des observations de quatre stations différentes (Bombay, Lisbonne, Greenwich et Saint-Pétersbourg). Après avoir exprimé la valeur du potentiel (déduite uniquement des valeurs des composantes horizontales observées dans ces stations) par une série harmonique de 38 termes, il en déduit par le calcul la force verticale, successivement dans les hypothèses que la variation est due à une cause extérieure ou à une cause intérieure à la Terre, et compare les deux séries de valeurs ainsi obtenues avec celles de la composante verticale réellement observées.

Il exprime les valeurs observées et celles calculées sous la forme

$$r_1 \cos (t - t_1)$$

et il juxtapose dans une série de Tableaux, représentés ensuite par des courbes, les deux valeurs calculées et celle observée de t_1 , et de même les trois valeurs de r_1 , pour chacune des stations considérées.

Ces Tableaux et ces courbes montrent nettement que :

1° Pour ce qui concerne t_1 , c'est-à-dire la phase de la variation, il y a une concordance remarquable entre les valeurs calculées dans l'hypothèse d'un

⁽¹⁾ *Philos. Transact.*, 1889, t. I, p. 467-512.

agent extérieur à la Terre et celles qui résultent de l'observation ; la discordance est, au contraire, absolue dans l'autre hypothèse ;

2° Pour ce qui concerne r_1 , c'est-à-dire l'amplitude de la variation, l'accord est également bien plus grand dans la première hypothèse que dans la seconde ; néanmoins les valeurs observées de r_1 se trouvent être beaucoup plus faibles que celles calculées dans l'hypothèse première : l'amplitude de la variation observée est bien moins grande que celle qui résulte du calcul.

M. Schuster attribue, et non sans une grande vraisemblance, cette apparente anomalie à l'action des courants induits qui doivent être produits dans la Terre par le potentiel magnétique variable, extérieur à celle-ci, qui cause la variation diurne. Le professeur Lamb (1) a étudié mathématiquement le problème des courants induits dans une sphère conductrice, par les variations d'un potentiel extérieur, et il est arrivé au résultat suivant : si l'on considère la Terre comme une sphère conductrice, la réduction d'amplitude observée s'explique parfaitement par l'action de pareils courants induits, mais cette réduction serait accompagnée d'un changement de phase que l'on n'observe pas. Mais, comme l'a indiqué le professeur Lamb, on peut concilier tous ces faits, en admettant que la conductibilité des couches extérieures de la Terre est bien moindre que celle des couches intérieures ; la réduction d'amplitude serait alors produite surtout par les courants induits dans les parties les plus centrales du globe, et le calcul indique que dans ce cas une considérable diminution d'amplitude n'est pas accompagnée par un changement sensible de phase.

L'explication du professeur Lamb paraîtra singulièrement fortifiée si l'on se rappelle que l'intérieur du globe doit très probablement avoir une conductibilité bien plus grande que l'écorce superficielle, car : 1° la quantité des métaux (et c'est l'opinion de tous les géologues) doit être proportionnellement bien plus grande près du centre de la Terre qu'à la surface ; 2° on sait que certains silicates deviennent bons conducteurs aux températures supérieures à 200°, et, d'une manière générale, la résistance de tous les corps mauvais conducteurs diminue quand leur température augmente ; on sait d'ailleurs que la température s'accroît rapidement avec la profondeur au-dessous du sol.

Si nous nous sommes étendu aussi longuement sur les travaux de M. Schuster, c'est qu'ils constituent assurément un des progrès les plus considérables qui aient été apportés dans notre connaissance de la variation diurne des éléments magnétiques. La conclusion de ces recherches est universellement admise actuellement, parmi ceux qui s'occupent de Magnétisme terrestre, et si nous avons insisté un peu sur ces travaux, c'est que, sans faire aucune hypothèse sur la

(1) *Philos. Trans.*, 1889 (1), p. 512-518.

nature physique des forces qui produisent la variation diurne, et sans d'ailleurs qu'ils nous donnent aucune indication sur le caractère physique de ces forces, ils indiquent nettement que CELLES-CI SONT EXTÉRIEURES A LA SURFACE DE LA TERRE, ce qui est une première et précieuse indication.

Si maintenant nous examinons, au point de vue purement physique, quelles peuvent être les forces qui produisent la variation diurne des éléments magnétiques, nous allons pouvoir resserrer le problème dans des limites plus étroites et plus précises.

Les principales hypothèses qui ont été proposées sont :

1° *Une action magnétique du Soleil.* — Cette explication soulève de nombreuses objections; il n'est pas certain tout d'abord que le Soleil soit capable d'agir comme un aimant, car les analogies terrestres ont prouvé expérimentalement que, aux températures élevées, la matière perd toute propriété magnétique, et, étant donnée la décroissance de l'action magnétique, proportionnellement au cube de la distance, il faudrait que le globe solaire ait une intensité moyenne d'aimantation plus de 10000 fois plus grande que l'intensité moyenne de l'aimant terrestre pour produire une variation du magnétisme terrestre sensible à nos appareils.

D'ailleurs Chambers et Lloyd (1) ont tous deux montré séparément, et par des méthodes fort simples, que, même dans l'hypothèse d'un Soleil suffisamment magnétique, il est impossible de rendre compte par une action magnétique directe de cet astre, des particularités de la variation diurne (nous verrons d'ailleurs dans la seconde partie de ce Chapitre que lord Kelvin a démontré qu'une pareille action directe du Soleil ne peut pas expliquer non plus les perturbations magnétiques).

Cette hypothèse doit donc être rejetée.

2° *Théorie de Faraday.* — Partant de la découverte faite par lui, que l'oxygène est magnétique, et que ses propriétés magnétiques diminuent quand on le chauffe, Faraday en conclut que, lorsque le Soleil chauffe une certaine partie de l'atmosphère terrestre, celle-ci est rendue moins magnétique que les portions soustraites ou moins exposées au rayonnement solaire. Ceci doit produire, comme l'a montré Faraday, un déplacement des lignes de force terrestres, qui agit corrélativement sur l'aiguille aimantée. Dans une série de Mémoires (2) Faraday a longuement discuté cette explication, si séduisante dans sa simplicité, de la période diurne, et il a montré que les particularités de cette période, telles qu'elles résultent de l'obser-

(1) *Proc. royal Irish. Acad.*, feb. 22, 1858; *Phil. Trans.*, 1863.

(2) *Philosophical Transactions*, t. I, 1851. *On atmospheric magnetism*, p. 42-79 et p. 85-122.

vation dans les latitudes les plus diverses, et à toutes les heures du jour, concordent bien, QUALITATIVEMENT, c'est-à-dire en phase et en direction, avec les effets que doit produire en chaque lieu le Soleil, sur l'état magnétique des portions de l'atmosphère successivement exposées à son plus grand rayonnement, par suite de la rotation de la Terre.

A cela, Balfour Stewart ⁽¹⁾ a objecté que, si l'explication de Faraday était exacte, on devrait, puisque l'action calorifique du Soleil est bien plus grande dans l'hémisphère Nord en été qu'en hiver (et inversement pour l'hémisphère Sud), observer une différence notable entre les conditions magnétiques moyennes de chaque hémisphère, en été et en hiver. Or il n'existe pas de pareilles variations dans la valeur absolue *moyenne* des divers éléments, entre l'été et l'hiver, dans aucun des deux hémisphères, la période annuelle et semi-annuelle ayant un caractère tout à fait autre, et étant très faible ⁽²⁾.

Nous ajouterons à cela que, puisqu'il est établi (*voir* Chap. II) que le Soleil rayonne moins de chaleur lors du maximum que lors du minimum des taches, la variation diurne devrait avoir sa plus grande amplitude (dans l'hypothèse de Faraday) lors du minimum de l'activité solaire. Or c'est le contraire qui a lieu; et bien plus, l'amplitude de la période diurne est *une fois et demie* plus grande lors du maximum que lors du minimum des taches.

Néanmoins nous n'avons pas voulu rejeter définitivement la théorie de Faraday, avant d'avoir discuté à fond l'idée de ce grand esprit, et nous allons brièvement tenter de voir si son explication permet (ne fût-ce qu'approximativement), de rendre compte de la *grandeur* des variations observées; autrement dit nous allons soumettre cette théorie à un criterium QUANTITATIF, en nous servant des données les plus récentes de la Physique.

Faraday, sans d'ailleurs qu'il ait examiné numériquement la question, pensait que si peut-être la perméabilité magnétique des couches inférieures de l'atmosphère n'était pas assez grande pour expliquer la grandeur des effets observés, celle des couches supérieures devait être bien plus grande à cause de leur température inférieure, et devait, malgré la distance de ces couches à l'aiguille aimantée, expliquer suffisamment l'amplitude des variations de celle-ci.

Or on sait actuellement ⁽³⁾ que la susceptibilité magnétique K d'un gaz est liée à sa pression P et à sa température absolue θ par l'expression (formule de

⁽¹⁾ *Philosophical Magazine*, t. XXI, p. 436.

⁽²⁾ Comme corollaire à cette judicieuse remarque de Balfour Stewart, nous remarquerons que l'effet du Soleil dans la production de la variation diurne de l'aiguille aimantée doit être, non pas un effet qui se prolonge lorsque la cause agissante a cessé (comme serait un effet calorifique), mais une action en quelque sorte immédiate et qui cesse en même temps que la cause agissante. On verra au cours de ce Chapitre que, dans notre théorie, l'action du Soleil a bien ce caractère.

⁽³⁾ H. DU BOIS, *Propriétés magnétiques de la matière pondérable* (Rapports du Congrès international de Physique, 1900).

Curie)

$$K = \frac{BP}{\theta^2},$$

où B est une constante, et cette formule a été trouvée exacte par tous les observateurs dans les limites de pression et de température les plus étendues. MM. Fleming et Dewar, notamment, ont montré il y a quelques années qu'elle s'applique fort bien à l'air gazeux refroidi à -180°C .

A 18°C . (que nous prendrons comme température moyenne ambiante) et sous la pression atmosphérique, on a pour l'air ⁽¹⁾

$$K = + 0,027 \cdot 10^{-6}.$$

Pour résoudre le problème que nous nous sommes posé il faut trouver comment varie le rapport $\frac{P}{\theta^2}$ lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère.

Or si, d'après la loi bien connue des météorologistes, on admet que la température diminue en moyenne de 1°C . pour 180^{m} d'élévation, on verra facilement que le rapport $\frac{P}{\theta^2}$ diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. Mais, en réalité, cette loi ne s'applique bien que pour de faibles hauteurs, et elle n'est plus vraie dès qu'on a dépassé quelques centaines de mètres.

Les récentes données obtenues grâce aux ballons-sondes munis d'enregistreurs qui atteignent des altitudes considérables, vont nous permettre d'examiner autrement ce point essentiel. M. Teisserenc de Bort a publié ⁽²⁾ des nombres et des diagrammes qui représentent les températures à différentes hauteurs dans l'atmosphère et à toutes les époques de l'année, telles qu'elles résultent des données de plus de cent ascensions de ballons-sondes. A l'aide des nombres de M. Teisserenc de Bort, nous avons calculé les hauteurs moyennes auxquelles se trouvent respectivement les isothermes 0°C . — 25°C ., — 40°C ., — 50°C . (l'isotherme $+18^{\circ}\text{C}$. étant par hypothèse au niveau de la mer). L'emploi de la méthode des moyennes est ici parfaitement légitime, car si la hauteur de ces diverses isothermes est assez variable avec les époques de l'année, il suffit de jeter un coup d'œil sur les diagrammes de M. Teisserenc de Bort pour voir que les variations en hauteur des diverses isothermes sont sensiblement parallèles, c'est-à-dire que la distance verticale entre deux de ces isothermes varie peu, c'est-à-dire, enfin, que la loi de variation de la température avec la hauteur est bien représentée par les moyennes que nous avons calculées. Pour connaître la valeur du rapport $\frac{P}{\theta^2}$ à différentes

⁽¹⁾ *Loc. cit.* (H. du Bois).

⁽²⁾ *Comptes rendus*, t. CXXIX, p. 417-420.

hauteurs, il reste encore à déterminer les valeurs de P correspondant à la hauteur moyenne des isothermes considérées. Or la formule de Laplace, convenablement écrite (et dans laquelle, pour simplifier, nous avons supprimé le terme hygrométrique qui ne produit que des corrections relativement insignifiantes), nous donne

$$\log P = \log P' - \frac{Z}{18429^m \left(1 + 0,003664 \frac{t + t'}{2} \right)}$$

dans cette formule où nous prenons $P' = 760^{\text{mm}}$ et $t' = + 18^{\circ}\text{C.}$, nous donnons à t successivement les valeurs : 0°C. , $- 25^{\circ}\text{C.}$, etc., et à Z les valeurs correspondantes trouvées à l'aide des nombres de M. Teisserenc de Bort. Nous pouvons alors écrire le tableau suivant qui synthétise ces résultats et où nous avons mis en regard les valeurs correspondantes de $\frac{P}{\theta^2}$, et celles de K .

$t^{\circ}\text{Centigr.}$	$\theta^{\circ}\text{absolue.}$	Z (altitude moyenne correspondante).	P.	$\frac{P}{\theta^2} \cdot 10^{-5}.$	K.
		m	mm		
$+18^{\circ}$	291°	0	760	897	$+0,027 \cdot 10^{-6}$
-25	248	6100	351	571	$+0,017 \cdot 10^{-6}$
-40	233	8200	261	481	$+0,014 \cdot 10^{-6}$
-50	223	10000	148	298	$+0,009 \cdot 10^{-6}$

Il ressort nettement de ce Tableau que, contrairement à ce que croyait Faraday, *la susceptibilité magnétique de l'air atmosphérique diminue à mesure qu'on s'élève.*

Elle diminue même dans des proportions considérables puisqu'elle est déjà réduite du tiers de sa valeur lorsqu'on a dépassé la moitié de la masse atmosphérique et que, lorsqu'on atteint l'altitude où celle-ci est réduite à $\frac{1}{5}$, la susceptibilité magnétique de l'air n'est plus égale qu'à $\frac{1}{3}$ environ de sa valeur au niveau du sol.

Dans ces conditions, nous pouvons montrer facilement que l'influence des propriétés magnétiques de l'atmosphère (*l'atmospheric magnetism*, suivant l'expression de Faraday) sur le champ terrestre est d'ordre absolument infime.

Si nous considérons, en effet, la susceptibilité magnétique de l'atmosphère comme uniforme et égale à sa valeur près du sol (ce qui est, comme nous venons de le voir, une valeur maxima extrême), et si nous considérons en un lieu de la terre, la portion de l'atmosphère qui est au-dessus de ce lieu, comme un cylindre de dimensions extrêmement grandes, l'induction maxima produite par le champ terrestre $\mathfrak{H}$, à l'intérieur de ce cylindre, est dans les conditions les plus favo-

rables

$$\mathfrak{H}_1 = \mathfrak{H}(1 + 4\pi K).$$

En réalité, l'aiguille aimantée est, non pas à l'intérieur, mais à la base de ce cylindre, où l'induction est plus voisine de $\mathfrak{H}(1 + 2\pi K)$ que de $\mathfrak{H}(1 + 4\pi K)$.

Dans les conditions les plus favorables à la théorie de Faraday, et qui sont des conditions limites maxima, l'effet de l'atmosphère est d'augmenter le champ terrestre de $\mathfrak{H} \times 4\pi K$. Or, en France, la valeur de la force totale du champ terrestre est environ 0,466 C. G. S. La fraction maxima de cette valeur due à l'atmosphère est donc :

$$\begin{aligned} \delta \mathfrak{H} &= 0,466 \times 4\pi \cdot 0,027 \cdot 10^{-6} = 0,1412 \cdot 10^{-6} \\ &= 0,0000001412. \end{aligned}$$

Or, d'après Faraday, ce sont les variations de la valeur de $\delta \mathfrak{H}$, dues au rayonnement solaire, qui produiraient la période diurne de l'aiguille aimantée. Si nous supposons que la chaleur due au rayonnement du Soleil dans l'atmosphère, devienne capable, à un moment donné, non seulement de diminuer, dans une certaine proportion, la perméabilité magnétique de l'atmosphère, mais même de la supprimer complètement, le champ terrestre serait au maximum diminué de 0,0000001412 ⁽¹⁾. Or, la période diurne produit (les années de minima des taches, c'est-à-dire lorsqu'elle est elle-même minima) une variation du champ terrestre égale à 0,00021, c'est-à-dire 1500 fois plus grande que celle qui se produirait si la perméabilité magnétique de l'atmosphère était tout d'un coup supprimée.

Les propriétés magnétiques de l'atmosphère ne peuvent donc avoir que des effets infimes sur le champ terrestre et, en particulier, elles ne peuvent produire qu'une fraction complètement négligeable de la période diurne.

Dans cette discussion nous avons, à dessein, exagéré considérablement toutes les circonstances les plus favorables à la théorie de Faraday. Il semble donc, en définitive, que cette idée du grand physicien doit être abandonnée.

3° *Action des courants telluriques.* — Nous ne rappelons que pour mémoire la théorie d'après laquelle la période diurne serait due aux courants qui circulent dans l'écorce terrestre. Les travaux de M. Schuster que nous avons analysés plus haut et dont les résultats sont inconciliables avec cette théorie, suffiraient à la faire rejeter. D'ailleurs, Airy a montré ⁽²⁾, par une discussion détaillée, qu'il n'y a aucune connexion entre la période diurne de l'aiguille aimantée et

⁽¹⁾ Cette variation ne pourrait être décelée par nos appareils d'observation les plus sensibles, tant elle est insignifiante.

⁽²⁾ *Philos. Trans.*, CLX, p. 226.

les variations des courants telluriques que l'on enregistre d'une manière continue à Greenwich et en d'autres stations.

L'idée que la variation diurne du magnétisme terrestre doit être produite par des courants électriques circulant dans l'atmosphère a été émise par Balfour Stewart. En réalité, l'origine de cette idée se trouvait déjà dans Gauss qui a dit quelque part ⁽¹⁾ : « Si les agents immédiats des variations magnétiques sont en partie extérieurs à la surface terrestre, et si nous éliminons des fantaisies sans fondement (*bodenlose Phantasien*), nous ne pouvons songer qu'à des courants galvaniques. Or, l'air atmosphérique, pas plus que le vide, ne conduit de tels courants. Il y a donc là une énigme... ».

La généralité des physiciens qui s'occupent de magnétisme terrestre s'accordent actuellement pour attribuer la période diurne à de pareils courants, sans que, à notre connaissance, on ait rationnellement étudié la possibilité de ceux-ci, et le rôle exact du Soleil dans leur production. Seul, Balfour Stewart a émis quelques idées là-dessus, et nous allons voir que, sous la forme qu'il leur a donnée, elles soulèvent de graves objections.

Les considérations suivantes ne seront donc pas tout à fait inutiles, si elles peuvent apporter quelque lumière sur ces points si essentiels et, cependant, si obscurs encore :

Le Soleil joue, incontestablement, un rôle important dans la production de la période diurne; d'une part, en effet, celle-ci est, comme nous le verrons dans la suite de ce Chapitre, affectée par les variations de l'activité solaire, et par la position de la Terre sur l'écliptique; d'autre part, la période diurne en un lieu, a toute son amplitude pendant les heures de la plus grande insolation (de 9^h du matin à 3^h de l'après-midi), tandis que l'aiguille aimantée ne varie que très peu pendant le reste de la journée et la nuit, c'est-à-dire que l'agent de cette variation a une intensité qui varie comme l'insolation. La variation diurne de la force totale a son élongation maxima au voisinage du moment où le Soleil passe au méridien, et, plus exactement, lorsqu'il passe au méridien magnétique.

Mais, tout d'abord, peut-il exister des courants galvaniques dans les hautes couches de l'atmosphère? Il n'est pas douteux que, comme le pensait Balfour Stewart, les mouvements de convection de ces couches doivent, sous l'influence de l'induction par la Terre, y engendrer des forces électromotrices... Mais, vu la faible valeur du champ terrestre, celles-ci doivent être extrêmement faibles par unité de longueur, comme l'indique le calcul. Et, d'autre part, on sait ⁽²⁾ que le passage de l'électricité à travers les gaz raréfiés ne peut se produire nor-

⁽¹⁾ *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*, p. 36.

⁽²⁾ *Congrès Internat. de Physique*, 1900. « Les gaz envisagés comme diélectriques ». BOUTY.

malement qu'à partir d'une différence de potentiel minima qui est toujours extrêmement grande et de beaucoup supérieure à celle que peut produire l'induction par le champ terrestre. C'est ce que MM. J.-J. Thomson, Bouty et d'autres ont nettement montré. La proposition établie au Chapitre I nous permet de résoudre aisément cette difficulté. On sait, actuellement, qu'un gaz raréfié, à condition d'être parcouru par une décharge auxiliaire, devient apte à conduire un courant dont la force électromotrice est aussi faible qu'on veut. Ce résultat a été étendu, et il a été montré ⁽¹⁾ que chaque fois qu'un gaz est illuminé électriquement (par exemple, sous l'influence des ondes hertziennes) il se laisse traverser par un courant de force électromotrice extrêmement faible ⁽²⁾. Donc, *sous l'influence des ondes hertziennes émancées du Soleil, les couches supérieures de l'atmosphère deviennent aptes à laisser passer les courants produits par l'induction terrestre; et l'intensité de ces courants doit varier en un lieu comme l'insolation et redevenir extrêmement faible quand le Soleil est sous l'horizon*. Ainsi s'explique que la variation diurne a toute son amplitude pendant les heures de la plus grande insolation.

Balfour Stewart pensait que c'est l'augmentation de température produite par le Soleil dans l'atmosphère supérieure qui permet la production de ces courants; mais cette explication n'est pas admissible, car il est démontré actuellement ⁽³⁾ que la différence de potentiel explosive diminue, il est vrai, sous l'influence de la température, mais de quantités extrêmement faibles, et reste elle-même *très grande* tant qu'on n'atteint pas la température du rouge. D'ailleurs, si cette hypothèse était vraie, la période diurne devrait avoir sa plus grande amplitude lors du minimum des taches solaires, puisque la chaleur rayonnée du Soleil est maxima à ce moment ⁽⁴⁾. Or, c'est le contraire qui a lieu.

Ayant ainsi démontré la possibilité des courants électriques circulant dans l'atmosphère supérieure, on peut se demander quelles doivent être la distribution de ces courants et leurs variations avec les heures du jour, pour produire la période diurne. Il est certain que, sous cette forme, le problème est indéterminé et admet un grand nombre de solutions différentes. Pour le déterminer davantage, il faut que ces courants soient assujettis à des conditions bien définies, par exemple à n'avoir pas de composante verticale, c'est-à-dire, à circuler dans une couche sphérique très mince de l'atmosphère concentrique à la Terre. M. Schuster a calculé dans cette hypothèse ⁽⁴⁾ que la variation diurne peut être

⁽¹⁾ WIED. *Annalen*, VII, p. 553 et 614; XIX, p. 782 et 813; XXXII, p. 545; XXXV, p. 220; *Proceed. Roy. Soc.*, XLII, p. 371.

⁽²⁾ RIGHI. *Rend. della R. Acad. dei Lincei*, 7 nov. 1897, et *Rend. della R. Acad. di Bologna*, 29 mai 1898.

⁽³⁾ V. *Rapports du Congrès International de Physique* 1900. « Les gaz envisagés comme diélectriques », par M. Bouty.

⁽⁴⁾ *Loc. cit.*

produite par un ensemble de courants dont il a déterminé pour diverses latitudes l'intensité et la direction aux diverses heures du jour.

Mais il semble difficile d'accepter sur ce point la manière de voir de M. Arthur Schuster. Tout d'abord la condition à laquelle il assujettit ces courants (à savoir qu'ils n'ont pas de composante verticale) nous paraît une hypothèse non fondée : la formule de Laplace, par exemple, permet de voir, en effet, que l'épaisseur de la couche atmosphérique où la raréfaction est suffisante pour permettre le passage des courants dans les conditions déterminées ci-dessus, est loin d'être négligeable par rapport à la distance de ces couches à la surface de la Terre, et est même plus grande que cette distance. D'autre part, si l'on examine les nombres qui, d'après le calcul de Schuster, représenteraient l'intensité et la direction de ces courants aux diverses heures du jour, pour Greenwich, par exemple, nous voyons que : 1° *la direction* de ces courants exécute progressivement une rotation complète de 360° en 24 heures ; or, nous ne concevons aucunement par quelle action naturelle, par quelle variation réelle des mouvements de convection de l'atmosphère, on pourrait expliquer ce caractère des courants atmosphériques ; 2° *l'intensité* de ces courants aurait sa valeur maxima au milieu de la nuit, et sa valeur minima aux heures de la plus grande insolation, au milieu du jour. Or, ceci est contraire aux caractères de l'action du Soleil dans la production de la période diurne, tels que nous les avons déterminés plus haut ; car, à moins de supposer (et rien ne semble justifier cette hypothèse) que la force électromotrice induite par l'action terrestre dans l'atmosphère supérieure est énormément plus grande la nuit que le jour (et il resterait encore à expliquer pourquoi le sens de cette force électromotrice varie progressivement de 360° chaque jour), nous avons vu, et c'est l'opinion de Schuster lui-même, que le Soleil paraît augmenter considérablement la conductibilité de l'atmosphère, et doit augmenter corrélativement l'intensité des courants électriques qui y circulent. Toutes choses égales, d'ailleurs, ceux-ci doivent donc avoir leur plus grande intensité le jour.

Pour toutes ces raisons, le système de courants qui a été déterminé par M. Schuster pour expliquer en grandeur et en direction le caractère de la période diurne, bien qu'expliquant numériquement ces caractères, ne semble pas correspondre à la réalité physique plus que tous les autres systèmes artificiels de courants que l'on peut imaginer pour expliquer la période diurne.

Il appartient à l'avenir de déterminer quel est celui de ces systèmes qui correspond le mieux à la réalité, et à ce que nous savons de la nature de l'action solaire ; mais pour cela il faudra que, par l'étude approfondie du baromètre et de la direction des vents aux grandes altitudes, on ait augmenté nos connaissances, si minimes jusqu'ici, sur les mouvements de convection des hautes couches de l'atmosphère.

II. — *Variation annuelle de la période diurne.* — Si notre conception de la variation diurne est exacte, celle-ci doit varier en amplitude avec l'intensité de l'insolation en chaque lieu, c'est-à-dire avec les saisons : cette amplitude doit avoir sa plus grande valeur en été dans l'hémisphère Nord, et en hiver dans l'autre hémisphère, et sa valeur minima en hiver dans notre hémisphère et en été dans l'hémisphère Sud. Or, l'observation vérifie point par point ces conséquences de notre théorie. On a, en effet, depuis longtemps, universellement constaté ce caractère de la période diurne aux différentes saisons dans les deux hémisphères.

A titre d'exemple, nous donnons ci-dessous pour chaque mois de l'année 1895 l'amplitude moyenne de la période diurne de l'aiguille de déclinaison, qui résulte des observations faites dans une station de chaque hémisphère (Nice et Batavia) :

	Nice.	Batavia.
1895 Janvier.....	5'7	29'0
Février.....	7'3	29'3
Mars.....	11'4	21'7
Avril.....	13'5	15'2
Mai.....	13'2	15'4
Juin.....	14'6 maximum.	14'7 minimum.
Juillet.....	13'1	17'2
Août.....	11'3	19'3
Septembre.....	10'9	23'5
Octobre.....	10'2	25'9
Novembre.....	6'9	26'4
Décembre.....	5'2	25'3
Moyenne.....	10'3	21'9

On voit que l'amplitude maxima se produit à Nice en juin et à Batavia entre janvier et février, et l'amplitude minima à Batavia en juin et à Nice entre décembre et janvier. Les autres éléments montrent dans leur période diurne une variation annuelle analogue.

L'exemple que nous avons choisi montre également que la période diurne a une amplitude toujours plus grande à Batavia qu'à Nice. Si, au lieu de Batavia, nous avions considéré une station (telle que Hobarton) dont la latitude S fût égale à la latitude N de Nice, nous aurions trouvé que la valeur moyenne pendant l'année de la période diurne de la déclinaison y est sensiblement la même qu'à Nice. Il y a là une loi générale, comme le montre l'observation : l'amplitude moyenne de la période diurne de la déclinaison diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. Or, c'est la composante horizontale H, du magnétisme terrestre, qui maintient l'aiguille de déclinaison dans sa position normale, et l'on sait que la valeur de H diminue dans les deux hémisphères à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur (elle est en effet, en C. G. S., 0,374 à Bombay ; 0,232 à

Rome; 0,223 à Perpignan; 0,196 à Saint-Maur; 0,184 à Greenwich, etc.). Puisque, d'autre part, l'amplitude moyenne de la variation diurne de la déclinaison diminue quand on s'éloigne de l'équateur, il s'ensuit nécessairement que *l'agent de la variation diurne doit avoir sa plus grande intensité à l'équateur*. Ceci encore est complètement d'accord avec ce que faisait prévoir notre théorie : l'insolation ayant en moyenne son intensité maxima dans les régions équatoriales et décroissant lorsque la latitude augmente, il s'ensuit en effet nécessairement que, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité des courants électriques de l'atmosphère, et par suite l'amplitude moyenne de la courbe diurne de la déclinaison, doit avoir sa plus grande valeur vers l'équateur.

III. *Variation undécennale*. — Dans cette variation, l'influence du Soleil se manifeste et se définit d'une manière beaucoup plus nette encore. Il n'y a aucun doute actuellement sur le rapport qui existe entre les taches solaires et le magnétisme terrestre.

C'est Lamont qui, en 1850, appela l'attention sur ce fait que la période diurne moyenne de l'aiguille aimantée a, dans son amplitude, une période d'environ 11 années. Peu après, Sabine en Angleterre, Gautier en France et Wolf en Suisse, ensemble et indépendamment, remarquèrent la coïncidence entre les maxima des taches et ceux des oscillations diurnes moyennes de l'aiguille aimantée. Depuis, les observations faites partout d'une façon continue ont confirmé d'une manière convaincante ce rapport, et montré que la courbe des valeurs de la période diurne de la déclinaison reproduit rigoureusement celle de la fréquence des taches solaires. De plus, ce rapport, qui n'avait été établi tout d'abord que pour la déclinaison, a été étendu aux variations des deux autres éléments. Ces faits ne sont actuellement contestés par personne; c'est donc uniquement à titre d'exemple que nous reproduisons ci-dessous, d'après M. Moureaux, les valeurs des variations diurnes moyennes des trois éléments, pendant une récente période de douze années, au Parc Saint-Maur; en regard, nous avons indiqué les nombres relatifs correspondants des taches solaires :

VARIATION DIURNE DES ÉLÉMENTS MAGNÉTIQUES ET NOMBRE DE TACHES SOLAIRES DE 1887 A 1898.

	1887.	1888.	1889.	1890.	1891.	1892.	1893.	1894.	1895.	1896.	1897.	1898.
Déclinaison	8'4	7'8	7'2	7'8	9'2	10'3	11'2	10'6	10'0	9'0	8'1	8'2
Comp. horiz. (1) . .	26	24	20	23	30	39	37	37	34	30	25	24
Comp. vertic. (1) . .	19	18	18	18	23	25	25	24	22	22	18	19
Force totale (1) . . .	24	22	21	22	30	34	34	33	29	28	24	23
Nombre de taches (Wolf)	13.1	6.8	6.3	7.1	35.6	73.0	84.9	78.0	64.0	41.8	26.2	26.7

(1) Pour les composantes horizontale et verticale et la force totale, les nombres écrits représentent des unités du 5^e chiffre (C. G. S.).

Depuis que cette relation entre l'activité du soleil et notre magnétisme terrestre est incontestablement établie, elle a passionné tous les esprits, sans que, en dehors de la constatation brutale des faits, on ait jusqu'ici fait un pas vers la solution de ce problème, vers l'explication rationnelle de ce rapport mystérieux qui relie les mouvements de la surface solaire à ceux de nos aiguilles aimantées. Et c'est peut-être précisément parce qu'elle est restée aussi énigmatique, que cette question préoccupe encore à ce point tous les esprits. Il y a quelques années encore, Young, dont les travaux sur le Soleil ont fait avancer sur tant de points notre connaissance de cet astre, écrivait : « Il est difficile d'imaginer une théorie satisfaisante pour expliquer cet effet des troubles solaires sur notre magnétisme terrestre.... Ce rapport magnétique prouve que d'autres forces que la gravitation agissent dans l'espace interplanétaire. » Et en 1892, à la Société Royale de Londres, parlant du problème de l'action directe du Soleil sur le magnétisme terrestre, lord Kelvin disait : « Jusqu'ici, tous les efforts tentés dans cette direction ont été infructueux. »

Il est clair, en effet, que tant qu'on n'a considéré le Soleil que comme capable, en dehors de la gravitation, d'agir sur les astres voisins uniquement par son rayonnement calorifique et lumineux, la question ne pouvait faire un pas. Il est impossible d'expliquer ces actions par un effet de température ; nous avons examiné plus haut, à propos de la période diurne, quelques-unes des objections qui nous ont conduit à exclure complètement l'idée d'un effet de ce genre. Mais bien plus ; si même (ce qui n'est pas) on pouvait expliquer par une action calorifique du Soleil les caractères de la période diurne et sa variation annuelle, on serait arrêté complètement lorsqu'il s'agit de sa période undécennale : nous avons vu en effet que la quantité de chaleur reçue par la Terre est minima au moment du maximum des taches, et la période undécennale de la variation magnétique diurne devrait, dans cette hypothèse, avoir des phases exactement contraires à celles qui résultent de l'observation.

La considération des phénomènes électriques qui doivent se produire dans le Soleil nous a conduit logiquement à déduire de toutes les circonstances reconnues par l'étude optique et spectrale du Soleil, des analogies terrestres, et des résultats récents les mieux établis de la Physique expérimentale, comme une chose infiniment probable, sinon certaine, que « le Soleil émet des radiations hertziennes et que celles-ci doivent avoir leur plus grande intensité lors du maximum de l'activité solaire ». Il semble que cette proposition, qui nous a déjà permis de jeter quelque lumière sur la période diurne magnétique, résout d'une manière fort simple le problème de la variation undécennale de cette période. Il est évident, en effet, que l'intensité des courants galvaniques de l'atmosphère supérieure doit varier comme l'intensité des radiations électromagnétiques reçues du Soleil. *La période diurne de l'aiguille aimantée doit donc avoir*

sa plus grande amplitude lors de la plus grande activité solaire et sa plus faible valeur lors du minimum des taches.

C'est, en effet, ce que montre l'observation.

B. — Perturbations des éléments magnétiques.

La relation qui relie la période de l'activité solaire à la courbe diurne de l'aiguille aimantée se précise et se manifeste d'une manière encore plus remarquable avec des phénomènes d'un caractère bien différent : les perturbations magnétiques. A certaines époques, l'aiguille aimantée est agitée par des mouvements brusques et variables, se produisant à n'importe quelle heure, et dont l'amplitude, qui dépasse fréquemment de beaucoup l'amplitude totale de la période diurne, atteint souvent $\frac{4}{200}$ de l'intensité totale du magnétisme terrestre, et quelquefois même $\frac{4}{30}$ et $\frac{4}{20}$ de cette valeur.

Parmi ces perturbations, quelques-unes paraissent avoir un caractère local et une origine uniquement terrestre : elles se manifestent peu à peu par une déviation graduelle des aiguilles aimantées, sans avoir été précédées d'aucun signe précurseur ; elles se produisent pour un des éléments avant de se montrer d'une manière quelconque pour les autres, dans une station donnée, sans que dans d'autres très éloignées ou même voisines, les aimants soient le moins du monde perturbés. D'autres, au contraire, et c'est le plus grand nombre, ont des caractères complètement différents : soit qu'elles se manifestent d'une manière absolument brusque au milieu d'une période de calme magnétique, soit qu'elles soient précédées de signes précurseurs d'agitation, elles affectent simultanément les trois éléments, et se produisent au même moment dans des stations très éloignées les unes des autres ; et elles donnent aux courbes des enregistreurs des inflexions irrégulières et brusques qui sont simultanées pour les trois éléments. Ces caractères sont parfaitement familiers à tous ceux qui ont la pratique des enregistreurs magnétiques. Nous y reviendrons d'ailleurs tout à l'heure.

Depuis longtemps, on a remarqué qu'il y a un parallélisme complet entre la fréquence de ces perturbations et celle des taches du Soleil. La relation de cause à effet de ces deux ordres de phénomènes, dont le parallélisme se poursuit jusque dans les détails, n'est plus contestée aujourd'hui : et le fait que les perturbations se produisent simultanément dans les stations les plus éloignées de la surface du globe prouve incontestablement, en effet, qu'elles sont dues à une cause cosmique ⁽¹⁾. De nombreux travaux, depuis ceux de Sabine jusqu'à ceux relativement récents de W. Ellis ⁽²⁾, de Sidgreaves ⁽³⁾, etc., ont conclu, sans

(1) *Proceed. of the Royal Society*, t. LII, p. 191-212.

(2) *Monthly Notices of the Roy. Ast. Soc.*, t. LX, p. 142-157.

(3) *The Observatory*, t. XXIV, p. 39-42.

qu'il puisse, semble-t-il, subsister aucun doute, à une connexion absolue entre les taches solaires et les perturbations magnétiques. Nous n'y insisterons donc pas.

Nous voulons cependant accorder une brève mention au Mémoire dans lequel Ellis (¹), à l'aide de documents très étendus, a confirmé, comme l'avait déjà indiqué le général Sabine, que les perturbations (celles du moins qui sont caractérisées à leur début par une déviation *brusque* et simultanée des trois éléments, et qui seules, de ce fait, se prêtent, sans erreur possible, à une comparaison de ce genre) sont rigoureusement simultanées dans les stations les plus éloignées de la Terre (les différences de 2 ou 3 minutes au plus, observées dans certains cas entre deux stations, rentrant amplement dans les limites d'erreurs des enregistreurs employés).

Le seul moyen d'avoir une indication précise sur le caractère exact de cette mystérieuse connexion entre l'activité solaire et nos perturbations magnétiques est l'étude individuelle des perturbations isolées et des taches correspondantes.

Or, voici ce que nous apprend une pareille étude :

1. On s'est demandé s'il existe une relation entre l'apparition des perturbations et la position des taches correspondantes sur le disque solaire; et des opinions, en apparence contradictoires (quoique basées les unes et les autres sur des documents très complets), ont été émises sur ce point. Tandis que M. Marchand (²) a conclu (et les diagrammes publiés par lui semblaient absolument convaincants) que les principales perturbations coïncident toujours avec le passage d'un groupe de taches ou de facules au méridien central du Soleil, M. Veeder (³) a trouvé, au contraire, une coïncidence parfaite entre les perturbations et l'apparition de taches ou de facules au bord est du Soleil. M. Tacchini, enfin, a soutenu que la position de la région perturbée sur le disque solaire n'a pas d'importance.

Or, c'est M. Tacchini qui a raison, sans d'ailleurs que les opinions de MM. Marchand et Veeder cessent de renfermer une part de vérité: M. G.-E. Hale (⁴) a montré en effet, par l'étude des clichés du Soleil avec taches et facules qu'il obtient à l'aide de son spectrohéliographe, qu'il y a une grande probabilité pour que, les années de grande activité solaire (et ce sont ces années que MM. Marchand et Veeder ont considérées dans leurs calculs), une facule au moins existe toujours au méridien central ou au bord est du Soleil. Sur 142 clichés pris en 1892 par M. Hale, 10 seulement ne montraient pas de facules au

(¹) *Proc. Roy. Soc.*, t. LII, p. 191.

(²) *Comptes rendus*, 10 janv. 1887.

(³) *Astronomy and Astrophysics*, 1892, p. 331, 434-436.

(⁴) *Comptes rendus*, t. CXVI, p. 240.

méridien central. Comme, d'autre part, le nombre de groupes de facules sur le disque solaire est indépendant de la longitude héliocentrique de la Terre, il en résulte qu'aux années de grande activité solaire la probabilité qu'à un instant donné un ou plusieurs groupes de facules se trouveront sur un méridien quelconque du Soleil est 93 pour 100. Enfin, dans un travail très complet publié récemment ⁽¹⁾, et qui embrasse toutes les observations magnétiques et solaires faites de 1881 à 1898 à l'Observatoire de Stonghurst, le P. Sidgreaves a montré que les perturbations magnétiques ne semblent pas correspondre à une position plutôt qu'à une autre des taches sur le disque solaire : il y a environ 18 pour 100 des coïncidences qui se rapportent à des taches situées au limbe est, 25 pour 100 sur le bord ouest, et 19 pour 100 sur le méridien central.

2. S'il n'y a pas de relation spéciale entre les perturbations et la longitude héliocentrique des taches, en revanche tous les observateurs s'accordent à reconnaître que la grandeur et l'importance des perturbations dépendent de l'état plus ou moins grand d'*activité* des taches correspondantes : fréquemment de grandes taches (lorsqu'elles sont calmes) existent sans qu'il se produise d'orage magnétique ; en revanche des perturbations intenses des aiguilles aimantées se montrent parfois lorsqu'il n'y a que des taches petites, mais qui sont le siège d'une vive agitation (que décèle soit l'étude visuelle ou photographique, soit l'observation spectrale). Tous les auteurs, y compris tous ceux que nous avons cités plus haut, s'accordent sans exception à reconnaître ces caractères : à savoir que la grandeur des taches est sans influence, et que leur état plus ou moins grand d'agitation est un facteur capital de la production des perturbations magnétiques. Ainsi, comme l'a le premier indiqué Tacchini, celles-ci correspondent moins à la présence même des taches (car celles-ci sont sans effet magnétique lorsqu'elles sont tranquilles) qu'à des CHANGEMENTS rapides de la surface solaire, et qu'à l'état d'*activité* rapide des taches et facules, que l'on reconnaît, nous le répétons, facilement par l'observation visuelle et photographique à l'aide de laquelle on peut suivre les variations rapides des taches, et surtout par l'étude spectrale qui, lorsque les taches sont violemment agitées, montre leurs raies renversées et distordues vers le rouge et le violet, indice certain de la vitesse radiale énorme des mouvements qui s'y manifestent. Nous verrons dans la suite de ce Chapitre quelques exemples caractéristiques de ces faits.

3. Il est une autre question, à tous égards *essentielle*, et sur laquelle cepen-

(1) *Loc. cit.*

dant les astronomes n'ont pas jusqu'ici porté suffisamment leur attention, puisqu'il n'existe aucun travail sur ce sujet; c'est celle de la *vitesse avec laquelle les perturbations du Soleil se transmettent au magnétisme terrestre*. L'étude de cette vitesse est certainement capitale; elle paraît de nature à nous renseigner d'une manière précise sur le caractère de ces phénomènes et la nature exacte de l'agent physique par l'intermédiaire duquel nos aiguilles aimantées subissent d'une manière aussi surprenante le contre-coup des éruptions du Soleil. Et c'est, enfin, dans cette étude que nous pourrions trouver le criterium certain des diverses théories qui ont été émises pour expliquer ces faits.

Pour toutes ces raisons, nous avons voulu apporter sur ce point une contribution personnelle, si minime fût-elle :

Nous ferons d'abord brièvement quelques remarques indispensables sur les limites des erreurs d'observation que l'on peut rencontrer dans l'étude des coïncidences entre les phénomènes solaires et magnétiques. Les enregistreurs magnétiques en usage dans les divers observatoires sont, soit du type Addie (en Angleterre notamment), soit du type Mascart (en France, etc.). Sur les courbes enregistrées par ces appareils, l'échelle des temps est malheureusement assez petite : dans les courbes de l'appareil Mascart, 1^{mm} d'abscisse correspond à 6 minutes de temps (dans l'appareil Addie l'échelle est légèrement plus grande et 1^{mm} d'abscisse correspond à environ 4 minutes); si l'on se rappelle d'autre part que la largeur du trait imprimé photographiquement n'est guère moindre (quand l'appareil est bien réglé) que 0^{mm},5; que cette largeur est elle-même très variable, au moment des perturbations, sur une même courbe, et dépend de la rapidité des mouvements des aimants, on comprendra qu'avec une échelle aussi réduite il est difficile de faire, au delà d'une certaine limite, des mesures parfaitement précises sur ces courbes. De plus, de légères erreurs peuvent résulter : 1° de la descente du châssis (commandé par un mouvement d'horlogerie) et dont la régularité n'est pas parfaite comme le montre l'expérience; 2° de l'allongement ou du retrait du papier photographique selon son état hygrométrique; 3° en cas de reproduction, du soin apporté au décalque (et nous n'avons pu étudier directement dans ce travail que les courbes originales de l'Observatoire de Nice; pour les autres stations nous n'avons eu à notre disposition que des décalques que l'on a bien voulu nous envoyer ou les reproductions lithographiques trouvées dans les publications). Pour toutes ces raisons, nous estimons (d'accord en cela avec M. Moureaux, directeur de l'Observatoire du Parc Saint-Maur, et M. Ellis, chef du service magnétique à Greenwich) qu'il n'est guère possible de garantir l'heure à moins de ± 2 minutes sur les courbes que nous avons étudiées.

D'ailleurs cette limite d'erreur est elle-même beaucoup plus faible, comme

nous le verrons, que les différences qui nous permettront de faire un choix entre les diverses théories.

Pour faire ce travail nous avons étudié parallèlement les littératures du Soleil et du magnétisme terrestre depuis une vingtaine d'années, et cela le plus complètement possible. Ce n'est que depuis une quinzaine d'années environ que l'on possède en France et dans quelques pays un enregistrement continu des phénomènes magnétiques. Auparavant les observatoires anglais seuls possédaient des enregistreurs, et à Greenwich même, on n'a commencé à publier quelques courbes qu'il y a vingt ans. Quant au Soleil, l'étude continue de sa surface n'est réalisée nulle part; on ne l'observe d'une manière un peu suivie que dans quelques observatoires d'Europe et d'Amérique, c'est-à-dire que pendant au moins 12 heures par jour nous n'avons aucun renseignement sur ce qui se passe dans le Soleil. Nous n'avons eu depuis 20 ans que deux époques d'activité solaire, vers 1881 et vers 1892, et ce n'est que pour cette dernière que l'on possède autre part qu'en Angleterre l'enregistrement continu des perturbations magnétiques. Pour toutes ces raisons, le champ de notre recherche a été singulièrement limité.

Enfin, et pour éviter toute cause d'erreur, toute équivoque dans l'interprétation des faits (et la nature même de cette recherche nous commandait cette précaution), nous avons volontairement exclu de notre étude tous les phénomènes d'activité solaire (d'ailleurs assez nombreux) dont on n'a pas rigoureusement observé le *début*, tous ceux qui ne se sont pas manifestés d'une manière *brusque* et, pour ainsi dire, instantanée. Des considérations exposées ci-dessus, il résulte que la probabilité pour qu'une manifestation soudaine d'activité, ainsi caractérisée, se produisant sur le Soleil, soit observée sur un point de la Terre, est évidemment très faible. Ainsi Young qui, toute sa vie, observa le Soleil visuellement et spectroscopiquement, d'une manière presque continue, n'a eu l'occasion d'observer que deux ou trois phénomènes de ce genre. Mais si, dans ces conditions, le nombre des phénomènes solaires éruptifs que nous aurons à considérer est forcément limité, les conclusions que nous pourrions tirer de chacun d'entre eux auront d'autant plus d'importance et semblent devoir être d'autant plus nettes.

Rappelons tout d'abord les quelques phénomènes ayant les caractères définis plus haut, qu'on a observés lors des deux maxima d'activité solaire qui ont suivi le milieu du siècle dernier. Ces faits sont restés classiques :

1° L'observation faite par MM. Carrington et Hodgson le 1^{er} septembre 1859 est célèbre : ce jour-là ces deux astronomes, dans deux stations distinctes, virent simultanément un phénomène dont ils ont donné l'un et l'autre la des-

cription complète ⁽¹⁾, consistant en deux ponts lumineux extrêmement brillants qui se formèrent *brusquement* au bord d'une grande tache et disparurent au bout de 5 minutes, après avoir parcouru environ 58000^{km}. Les deux observateurs s'accordèrent à dire que le début soudain du phénomène s'était produit entre 11^h 18^m et 11^h 20^m (temps moyen de Greenwich). Or, les courbes magnétiques de l'Observatoire de Kew (le seul établissement qui, à notre connaissance, possédât à cette époque des enregistreurs) montrent ⁽²⁾ qu'une perturbation très étendue et *soudaine* des trois éléments se produisit ce jour-là à 11^h 20^m, c'est-à-dire que les débuts des perturbations solaire et magnétique se produisirent d'une manière rigoureusement synchrone dans les limites d'erreur définies ci-dessus.

2° Young, pendant le maximum d'activité solaire qui suivit celui de 1859, a eu la bonne fortune d'observer spectroscopiquement plusieurs faits analogues. Voici d'ailleurs comme il les rapporte ⁽³⁾ : « Le 3 août 1872, dans le voisinage d'une tache solaire qui apparaissait à ce moment sur le bord du Soleil, la chromosphère présenta à plusieurs reprises de grandes perturbations pendant la matinée. Des jets de matière lumineuse d'un éclat intense s'élançaient du Soleil, et les raies sombres du spectre furent renversées par centaines, pendant plusieurs minutes de suite. Il y eut trois PAROXYSMES particulièrement remarquables à 8^h 45^m, 10^h 30^m et 11^h 50^m du matin (temps moyen de Sherman dans les Montagnes Rocheuses où Young faisait ses observations) ». Young ajoute que, précisément pendant qu'il observait, celui de ses collaborateurs qui était chargé des observations magnétiques constata des mouvements extraordinaires de l'aiguille aimantée. D'autre part, Young ayant reçu les courbes magnétiques pour ce jour-là, de deux observatoires anglais, Greenwich et Stonyhurst, remarqua que, sur ces deux courbes, les trois paroxysmes qu'il avait observés aux États-Unis étaient accompagnés de secousses brusques identiques et correspondantes des aimants, qui, « en tenant compte de la différence de longitude, furent simultanées avec les perturbations spectroscopiques observées sur les Montagnes Rocheuses... »

3° Le 5 août 1872, Young observa un phénomène analogue. Et ici la coïncidence a un caractère encore plus net, car le 5 août fut, en dehors de la perturbation qui nous occupe, un jour calme au point de vue magnétique, tandis que le 3 août les aimants avaient été plus ou moins agités toute la journée. Donc le 5 août, dans la même tache, Young observa à 6^h 40^m « un des phénomènes les plus remarquables qu'il ait jamais vus », suivant son expression. » « Les raies de

(1) *Monthly Notices of the Roy. Astron. Society*, t. XX (1859), CARRINGTON, p. 13-15, HODGSON, p. 15-16.

(2) *Loc. cit.*, p. 15.

(3) YOUNG, *Le Soleil*, p. 124-126.

l'hydrogène ainsi que beaucoup d'autres furent renversées d'une manière brillante dans le spectre du noyau et la raie C se déplaça vers l'extrémité supérieure du spectre, indiquant un mouvement radial d'environ 120 milles (192^{km}) par seconde... » Le phénomène dura environ 1 heure. Or, sur les courbes magnétiques reçues de Greenwich et de Stonyhurst, Young observa pareillement que, en tenant compte des longitudes, l'aiguille aimantée qui était calme auparavant eut une secousse brusque à la minute même où l'éruption observée par lui commençait et resta agitée pendant environ 1 heure (comme la tache solaire elle-même) pour reprendre ensuite son allure calme.

Young conclut de ces faits et de celui observé par Carrington et Hodgson qu'il est « extrêmement probable que chaque perturbation importante de la surface solaire se transmet à notre magnétisme terrestre avec la vitesse de la lumière ».

Arrivons maintenant aux exemples que, dans notre étude de la question, nous avons nous-même trouvés de faits analogues, et dont quelques-uns nous paraissent encore plus caractéristiques que ceux rapportés par Young. Nous procéderons par ordre de dates :

4° Le 17 juin 1891, M. Trouvelot ⁽¹⁾ était en train d'observer dans la matinée le Soleil dont il avait projeté l'image sur un écran, quand, à 10^h 16^m (temps moyen de Paris), son attention fut tout à coup attirée par l'apparition d'un « phénomène lumineux extraordinaire, qui ne ressemblait en rien à ce qu'il avait observé jusqu'alors sur le Soleil ». Et il décrit ainsi le phénomène : « Tout contre le bord occidental de l'astre on voyait une tache lumineuse sous-tendant un arc de 3° sur le limbe et qui surpassait bien loin en éclat les facules les plus brillantes que j'ai observées jusqu'ici... Cette lumière avait un aspect tout particulier qui la distinguait à première vue de celle des facules même les plus brillantes... » Après deux ou trois minutes, Trouvelot remplaça l'oculaire par un spectroscopie grâce auquel il observa que ce phénomène consistait en « un centre éruptif duquel s'échappaient des espèces de bombes volcaniques, extralucidescentes, qui s'élevaient dans les hauteurs à 2' ou 3' au-dessus de la chromosphère... » Et il ajoute : « Malgré l'éclat éblouissant de cette éruption, il devint évident pour moi que le phénomène lumineux s'était notablement affaibli pendant les quelques minutes employées à ajuster le spectroscopie. Vouloir m'assurer du fait, je retirai promptement cet instrument et le remplaçai de nouveau par l'oculaire, et je projetai l'image sur l'écran. Là où quelques minutes plus tôt étincelait une si éblouissante lumière, on ne voyait rien d'inusité, pas même la plus faible trace de facule... » Et Trouvelot ajoute en terminant la Note qui décrit cette observation : « ... Dans la littérature solaire, nous

(1) *Comptes rendus*, t. CXII, p. 1419-1421.

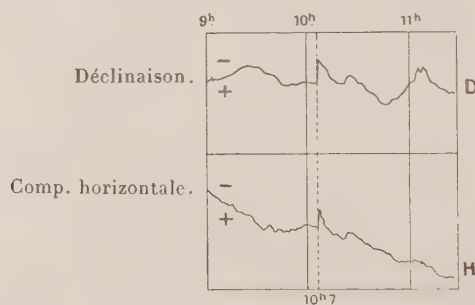
ne voyons que les deux observations simultanées, dues à Carrington et Hodgson, faites le 1^{er} septembre 1859, qui semblent avoir quelque rapport avec le phénomène que nous avons observé. »

L'observation de Trouvelot se rapproche en effet sur bien des points de celle de Carrington et Hodgson, et, comme cette dernière, elle est particulièrement précieuse pour l'étude qui nous occupe en ce sens qu'il s'agit d'une perturbation solaire dont le début, nettement observé, s'est produit brusquement avec une intensité extraordinaire et qui a disparu ensuite rapidement. Cette perturbation a-t-elle été accompagnée d'un phénomène magnétique analogue à celui qui fut simultané avec l'éruption observée par Carrington et Hodgson?

M. Turner, chef du service magnétique à l'observatoire de Greenwich, en examinant les courbes magnétiques enregistrées dans cet établissement le 17 juin 1891, y a trouvé une perturbation faible, quoique très nette, précisément à la minute notée par Trouvelot comme étant celle du début du phénomène observé par lui. M. Turner s'exprime ainsi à ce sujet (1) : « Ainsi à 10^h7^m (ce qui correspond à 10^h16^m, temps moyen de Paris), dans une très faible limite d'erreur, il s'est produit *brusquement* une légère perturbation simultanée des trois aimants (enregistrant la déclinaison, la force horizontale et la force verticale)... Cette perturbation, qui n'a pas une grandeur exceptionnelle, se distingue nettement d'autres qui se sont produites le même jour par sa brusquerie (*abruptness*), qui est clairement visible sur les trois courbes... » La figure 6,

Fig. 6.

Courbes magnétiques de l'Observatoire de Greenwich (enregistreur Addie), du 17 juin 1891 (de 9^h à 11^h20, temps moyen de Greenwich).



qui est un calque aussi exact que possible des courbes de Greenwich au moment du phénomène, illustre nettement ces caractères.

Nous avons, de notre côté, examiné les courbes magnétiques du 17 juin 1891 de l'observatoire de Nice, que M. Perrotin a bien voulu mettre à notre disposition; le résultat de cet examen peut se résumer ainsi: à 10^h36^m, temps moyen de

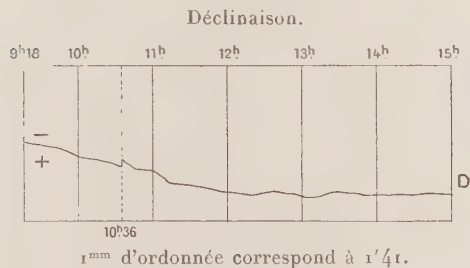
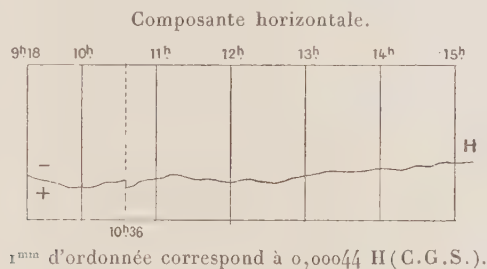
(1) *Astronomy and Astrophysics*, 1892.

Nice (ce qui correspond à 10^h16^m , temps moyen de Paris), exactement, il s'est produit une déviation légère, mais *extrêmement brusque* et simultanée des aimants; cette déviation, qui se manifeste par une inflexion subite et à angle aigu des courbes, a donné à celles-ci une direction momentanée presque verticale; en particulier pour la déclinaison, la déviation a été si rapide que le papier n'est impressionné que d'une manière à peine visible dans cette portion verticale de la courbe.

Ces caractères sont donc les mêmes que ceux qui ont été relevés à la même heure par M. Turner sur les courbes de Greenwich; ils sont même, en quelque sorte, plus nets encore, en ce sens que le 17 juin 1891 fut à Nice un jour *exceptionnellement* calme au point de vue magnétique, car ce jour-là (comme on le voit par la figure 7) les courbes, en dehors de la perturbation qui nous occupe,

Fig. 7.

Courbes magnétiques de l'Observatoire de Nice (enregistreur Mascart), du 17 juin 1891 (de 9^h18 à 15^h , temps moyen de Nice).



eurent toute la journée une allure parfaitement calme, tandis qu'à Greenwich il se produisit ce jour-là plusieurs agitations des aimants, d'un caractère local d'ailleurs, outre la perturbation caractéristique de 10^h7^m (temps moyen de Greenwich).

En résumé, la perturbation solaire instantanée du 17 juin 1891 a été accompagnée d'une perturbation également instantanée des éléments magnétiques comme cela s'était produit lors du phénomène observé par Carrington et Hodgson; cette perturbation magnétique, à Greenwich comme à Nice, s'est distinguée nettement des perturbations ordinaires de caractère local et d'origine terrestre, par la déviation brusque et simultanée des éléments, donnant aux courbes enre-

gistrées une allure momentanément rectiligne et presque verticale [rappelons que les travaux étendus de Sabine, puis d'Ellis (1) ont établi que les perturbations qui ont ces caractères sont toujours simultanées sur toute la terre et doivent être attribuées à une cause cosmique]; de plus, le début soudain de la perturbation magnétique s'est produit rigoureusement à la minute où Trouvelot observait le début également brusque de la perturbation solaire. Il s'ensuit que cette dernière (dans les limites des erreurs d'observation dont nous examinerons plus loin la signification) s'est transmise à notre Magnétisme terrestre avec la vitesse de la lumière.

Les phénomènes du 17 juin 1891 ont donc été de tous points les mêmes que ceux du 1^{er} septembre 1859. Cependant, au point de vue quantitatif, la perturbation magnétique du 17 juin 1891 a eu une amplitude bien moins grande que celle du 1^{er} septembre 1859, tout en étant de nature identique. Il n'y a rien là qui doive étonner : l'intensité des décharges électriques produites dans les perturbations de la surface solaire doit certainement varier avec une foule de circonstances, et de même et parallèlement la grandeur des effets produits par elles sur nos aiguilles aimantées.

5° Le 11 juillet 1892, M. Townsend était en train d'examiner au spectroscopie une tache remarquable qui, trois jours auparavant, avait fait son apparition au bord Est du Soleil, lorsque, à 11^h45^m (temps moyen de Greenwich), il s'y montra des signes d'agitation extraordinaire qu'il décrit ainsi : « La raie C se trouvait renversée d'une manière si brillante sur les deux noyaux méridionaux de la tache que je pouvais élargir la fente en lui donnant toute la largeur de ce noyau sans que la raie cesse de se montrer renversée dans toute la surface de ceux-ci, qui avait partout une incandescence éblouissante, etc.... Or, j'ai eu l'occasion d'observer sur des taches plus de cent cas de renversements de la raie C, et dans aucun cas, pas même lors de la tache de février 1892, la raie C ne m'avait montré des renversements aussi brillants que cette fois... Mais ces renversements de la raie C n'étaient pas seulement confinés aux noyaux de la tache, mais ils étaient même très brillants dans la pénombre... Une foule d'autres raies étaient brillamment renversées. Quant aux raies D et B, elles avaient un éclat bien supérieur à tous ceux que j'avais jamais constatés même dans ces protubérances.... »

Et Townsend ajoute : « Ce phénomène était tout à fait semblable à celui que Young observa dans la raie C le 3 août 1872. » (*Voir ci dessus, § 2°.*)

Or M. Sidgreaves, en examinant les courbes magnétiques de l'observatoire de Stonyhurst, du 11 juillet 1892, constata que précisément ce jour-là, à 11^h45^m (temps moyen de Greenwich), » une déviation brusque et simultanée des

(1) *Loc. cit.*

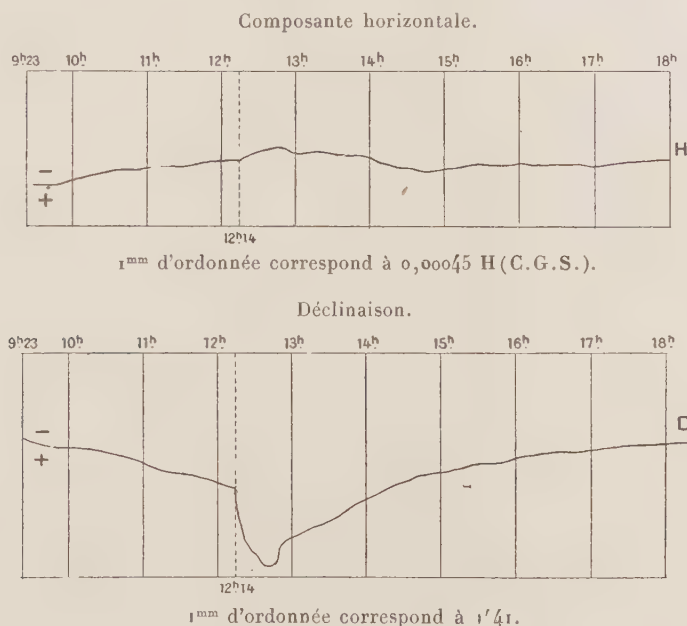
aimants interrompit seule leur course qui, sans cela, était calme. » Et Sidgreaves ajoute cette remarque : « Lors d'une perturbation semblable en tous points observée en août 1872 par le professeur Young, une perturbation dans la courbe calme de l'aiguille aimantée coïncida pareillement avec l'orage solaire.... » (*Voir ci-dessus.*)

M. Nash, chef du service magnétique à Greenwich, a bien voulu nous écrire que la même perturbation brusque que celle observée sur les courbes de Stonyhurst est visible sur les courbes magnétiques de Greenwich, précisément à $11^{\text{h}}45^{\text{m}}$ (temps moyen de Greenwich); en ce qui concerne en particulier la déclinaison, M. Nash nous a écrit : « Une brusque déviation commença à $11^{\text{h}}45^{\text{m}}$ précises, dont l'amplitude totale atteignit $13'$. »

Enfin, les courbes de l'observatoire de Nice montrent des phénomènes identiques (*fig. 8*) : à $12^{\text{h}}14^{\text{m}}$, temps moyen de Nice (ce qui, étant donnée la diffé-

Fig. 8.

Courbes magnétiques de l'Observatoire de Nice (enregistreur Mascart) du 11 juillet 1892 (entre $9^{\text{h}}23$ et 18^{h} , temps moyen de Nice).



rence des longitudes, correspond exactement à $11^{\text{h}}45^{\text{m}}$, temps moyen de Greenwich), les éléments sont brusquement perturbés : la courbe de la composante horizontale, jusque-là absolument calme, subit une inflexion soudaine, quoique légère, se manifestant par un angle vif; quant à la déclinaison, elle subit une brusque déviation, dont l'amplitude totale finit par atteindre $16'$, c'est-à-dire presque la même valeur que la déviation produite en même temps à Greenwich.

Ici encore, le début net de la perturbation magnétique, simultané pour tous

les éléments en des stations éloignées, s'est produit à la minute même où l'on observait le début soudain de la perturbation solaire.

Ainsi les cinq exemples caractéristiques que nous venons d'examiner de perturbations solaires soudaines et dont le début a été nettement enregistré, ont été accompagnés chaque fois de perturbations magnétiques également brusques, et dont le début a nettement coïncidé avec la minute où l'on a observé le début de la perturbation solaire. Chaque fois, les perturbations magnétiques observées dans diverses stations éloignées, au même instant physique, ont été caractérisées par la simultanéité de la déviation pour tous les éléments et par l'inflexion subite donnée aux courbes (caractères qui, comme l'ont montré Sabine et Ellis, sont toujours ceux des perturbations se produisant simultanément, sur toute la Terre et d'origine cosmique, tandis que les perturbations d'origine locale ne donnent jamais aux courbes que des inflexions progressives qui n'affectent pas en même temps les trois éléments).

Il s'ensuit donc nettement que les perturbations solaires se transmettent à notre magnétisme avec la VITESSE DE LA LUMIÈRE. Si même on admet que, dans chacun des cas que nous avons examinés, l'erreur *maxima* ait été faite dans le relevé des courbes (et nous avons vu que cette erreur possible est de 2^m) et que chaque fois cette erreur ait eu le même signe, favorable à une vitesse moins grande de l'agent solaire qui nous transmet ces perturbations (et il est en réalité bien improbable que les erreurs aient eu chaque fois le même sens), on trouve comme *limite inférieure* de la valeur de cette vitesse V, en désignant par v la vitesse de la lumière

$$V = v \times \frac{8}{8 + 2} = \frac{v \times 4}{5}.$$

Examinons maintenant avec ces éléments les diverses théories qui ont été proposées de l'action immédiate du Soleil sur le magnétisme terrestre.

Nous avons déjà, dans les Chapitres précédents, indiqué un certain nombre d'objections sérieuses que soulève la théorie de M. Arrhénius; nous y reviendrons d'une façon plus détaillée dans le prochain Chapitre de ce travail (*Sur les aurores boréales*); car c'est plus spécialement à propos des Aurores que M. Arrhénius a développé son ingénieuse hypothèse. Contentons-nous ici de remarquer que cette théorie ne peut en aucune façon expliquer la relation entre les Taches et les perturbations magnétiques, car en attribuant aux particules de M. Arrhénius la plus grande vitesse qu'elles puissent posséder sous l'action de la pression de radiation solaire, et dans les conditions les plus favorables d'après l'auteur lui-même, on trouve qu'il leur faudrait au moins 16 heures pour nous parvenir du Soleil, c'est-à-dire un temps incomparablement plus grand que celui qui résulte, comme nous venons de le voir, de l'observation des phénomènes.

Donc (en dehors de la doctrine d'une action magnétique directe du Soleil, sur laquelle nous reviendrons tout à l'heure), deux théories restent en présence : celle qui est basée sur l'hypothèse d'un rayonnement cathodique émané du Soleil, et qui a été émise par Goldstein et développée sur divers points par M. Deslandres et par M. Birkeland (nous l'appellerons pour abrégé *Théorie cathodique*) et la conception que nous avons émise nous-même (et que nous appellerons *Théorie hertzienne*).

Dans le Chapitre III de ce travail nous avons vu déjà que, pour plusieurs raisons, l'idée même d'un rayonnement cathodique qu'émettrait le Soleil paraît soulever quelques difficultés auxquelles échappe l'hypothèse d'un rayonnement hertzien de cet astre. Mais, en dehors de cette discussion *a priori*, nous avons pensé que seule la comparaison des *faits d'observation* avec les conséquences logiques de ces deux théories envisagées isolément pouvait permettre de juger de leurs valeurs respectives ; nous avons déjà, notamment à propos de la Couronne solaire, fait cette comparaison et nous avons trouvé qu'elle paraît défavorable à la *Théorie cathodique*. Nous allons brièvement faire un examen analogue en ce qui concerne les perturbations magnétiques. Comme nous l'avons vu, l'observation montre que :

1° *Les orages magnétiques sont produits par des perturbations actives de la surface solaire.* L'émission des rayons cathodiques (dans les idées de Goldstein), comme celle des ondes hertziennes (voir Chap. I), doit, en effet, être particulièrement intense dans ces conditions. Ici donc, les deux théories sont également d'accord avec les faits.

2° *La longitude héliocentrique des centres d'activité solaire n'a pas d'influence sur la production des perturbations magnétiques,* c'est-à-dire que l'agent solaire des perturbations magnétiques se propage également dans toutes les directions, à partir du point du Soleil où il a pris naissance. Ici encore, la *Théorie hertzienne* est bien d'accord avec les faits (on sait, en effet, que les ondes hertziennes produites par une décharge se propagent indifféremment dans tous les sens, quelle que soit l'orientation de la décharge). Il n'en est pas de même pour la *Théorie cathodique* : comme l'ont indiqué M. Goldstein ⁽¹⁾, puis M. Deslandres ⁽²⁾, les rayons cathodiques doivent dans leur hypothèse être émis normalement à la surface solaire, suivant un faisceau très limité. M. Goldstein ⁽³⁾ a même indiqué qu'on pourrait, dans cette limitation des faisceaux cathodiques solaires (à laquelle ne correspond, lorsque la distance augmente, qu'une diminution très faible d'intensité), chercher l'explication de la grandeur des effets produits

(1) *Wied. Ann.*, t. XII, 1881, p. 266.

(2) *Comptes rendus*, t. CXXVI, p. 1326.

(3) *Loc. cit.*

dans certains cas par le Soleil sur notre magnétisme. De son côté, M. Deslandres a indiqué ⁽¹⁾, suivant ses propres expressions, « une conséquence de cette théorie qui se prête à une vérification ; les variations passagères d'éclat des comètes doivent correspondre au passage de fortes taches, près de la ligne qui joint la comète au centre du Soleil. » Or, non seulement cette vérification n'a jamais été faite, en ce qui concerne les comètes, mais la preuve du contraire a été faite, pour ce qui est des perturbations magnétiques, puisqu'il résulte des observations (*voir* ci-dessus) que le nombre et la grandeur des perturbations magnétiques sont indépendants de la position des centres d'activité du Soleil, par rapport au méridien de cet astre, contrairement à ce qui devrait avoir lieu si la théorie cathodique était exacte. Ici donc la *Théorie hertzienn*e est de nouveau d'accord avec ces faits ; la *Théorie cathodique* est en contradiction avec eux. Nous verrons dans le Chapitre suivant que l'étude, non plus seulement des perturbations magnétiques, mais de leur fréquence et des périodes de celle-ci, conduit à des résultats identiques.

3° *Les perturbations solaires se transmettent, dans les limites des erreurs d'observation, au magnétisme terrestre, avec la vitesse de la lumière.* Or on sait que les ondes hertziennes se propagent avec la vitesse de la lumière, c'est-à-dire que la *Théorie hertzienn*e est, ici encore, confirmée par les faits. Il n'en est, semble-t-il, pas de même de la *Théorie cathodique*. Si l'on peut admettre, avec beaucoup de vraisemblance, d'après la théorie actuelle des rayons cathodiques, que ceux-ci, lorsqu'ils sont produits sous une différence de potentiel suffisante, doivent se propager avec une vitesse voisine de celle de la lumière (*en fait*, la plus grande vitesse mesurée jusqu'ici expérimentalement pour ces rayons n'a pas dépassé 100 000^{km} par seconde), il n'en reste pas moins, comme nous l'avons montré à propos de la couronne solaire (*voir* ci-dessus, Chap. III) : 1° que, pour que des rayons cathodiques produits par les décharges électriques de la partie basse de l'atmosphère solaire puissent se propager vers l'extérieur dans l'espace, il faudrait que le champ électrique du Soleil ait le même sens que celui de la Terre ; 2° que tous ceux (MM. Deslandres, Siemens, Arrhénius) qui ont étudié la question du champ électrique de l'atmosphère solaire ont été amenés à conclure que ce champ doit, au contraire, avoir un sens opposé à celui-là et doit, par suite, s'opposer à toute propagation des rayons cathodiques vers l'extérieur. On sait, au contraire, que la propagation des ondes hertziennes se fait avec la même vitesse dans toutes les directions, et quel que soit le champ électrique.

La *Théorie cathodique* semble donc en défaut.

(1) *Loc. cit.*, p. 1276.

En 1892, à la Société Royale de Londres, lord Kelvin s'est demandé si, « guidé par la Théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, et la Théorie ondulatoire de la force magnétique, on ne pourrait pas espérer résoudre le problème, pendant depuis cinquante ans, de l'action magnétique directe du Soleil sur les orages magnétiques terrestres, quoique jusqu'ici tous les efforts tentés dans cette direction aient été infructueux » (1); et l'illustre savant s'est livré, à ce sujet, à une discussion, restée célèbre, et où il examine si l'on peut attribuer les perturbations magnétiques à une action magnétique directe du Soleil (regardé comme un aimant). Au cours de cette discussion, lord Kelvin a étudié une perturbation donnée (d'ailleurs peu intense) d'origine nettement cosmique, c'est-à-dire dont tous les mouvements ont été enregistrés simultanément par les enregistreurs de divers points du globe dont il s'était procuré les courbes. A l'aide de ces documents, lord Kelvin a calculé que les variations d'intensité des divers éléments pendant cette perturbation (qui dura quelques heures) représentaient de la part de l'agent d'origine solaire un travail moyen de 12×10^{35} ergs par seconde, c'est-à-dire environ 364 fois l'énergie totale du rayonnement solaire (qui est environ $3,3 \times 10^{32}$ ergs par seconde). Et lord Kelvin conclut de la sorte : « Ainsi, dans les 8 heures de cet orage magnétique, qui fut relativement modéré, il faudrait que le Soleil ait produit, sous forme d'ondes magnétiques, autant d'énergie qu'il en produit régulièrement sous forme de lumière et de chaleur rayonnées dans l'espace en quatre mois. Ce résultat me paraît exclure complètement (*is absolutely conclusive against*) l'hypothèse que les orages magnétiques terrestres sont dus intrinsèquement à une action magnétique *directe* du Soleil, ou à n'importe quelle action dynamique *directe* de cet astre. »

La conclusion de lord Kelvin et sa démonstration semblent absolument irréfutables; tout le monde les admet actuellement. Ainsi, pas plus pour les perturbations magnétiques que pour la période diurne des trois éléments (comme nous l'avons vu), la théorie d'une action directe du Soleil n'est soutenable.

Grâce à notre conception d'un rayonnement solaire hertzien, nous allons pouvoir, semble-t-il, examiner la question sous un autre jour, et voir que, dans les perturbations magnétiques, l'effet du Soleil doit être simplement, et grâce à une énergie initiale relativement faible, de produire, par une sorte de déclenchement, la mise en jeu de forces qui existent à l'état latent sur notre globe; de même que, dans la télégraphie, un courant électrique très faible est capable, grâce à l'intermédiaire du relai, de produire des effets mécaniques relativement considérables; ou, pour employer une comparaison encore plus adéquate à notre conception, de même que, dans la télégraphie sans fil, des ondes hert-

(1) *Proceedings of the Royal Society*, t. LH, 1892-1893, p. 303-309.

ziennes extrêmement faibles, grâce à l'action du cohéreur, peuvent mettre en jeu une quantité d'énergie très grande et disproportionnée avec l'intensité minime des ondes excitatrices; car cette énergie peut être aussi grande que l'on veut et ne dépend que du nombre des éléments de pile mis en circuit avec le cohéreur.

Nous avons vu déjà, à propos de la période diurne, que Righi ⁽¹⁾ et d'autres ont montré que les gaz raréfiés passent sous l'influence des ondes hertziennes, d'une résistance pratiquement infinie à une résistance extrêmement faible, et que lorsqu'un tube à gaz raréfié est mis en circuit avec une pile et un galvanomètre, celui-ci restant au zéro, l'aiguille est violemment déviée si l'on produit des ondes hertziennes dans le voisinage (ce tube se comportant comme une sorte de radioconducteur). Quelque chose d'identique doit se produire dans l'atmosphère : *quand, comme nous l'avons vu (voir Chapitre I), par l'effet des perturbations brusques de la surface solaire, le rayonnement hertzien du Soleil devient bien plus intense, la conductibilité des couches atmosphériques supérieures est notablement augmentée, et l'effet des courants électriques qui y circulent, sur nos aiguilles aimantées, devient lui-même très grand.* Non seulement, comme nous venons de le voir, tous les caractères généraux des perturbations solaires et magnétiques concordent avec cette manière de voir, mais les particularités mêmes des orages magnétiques semblent parfaitement d'accord avec elle. D'une part, en effet, on a démontré (Schmidt notamment) ⁽²⁾ que les perturbations magnétiques sont, comme la période diurne, dues à une cause extérieure à la surface de la Terre. D'autre part, les caractères si particuliers des courants telluriques que l'on enregistre, à Greenwich et à Saint-Maur notamment, simultanément avec les perturbations, sont conformes à notre conception et sont expliqués par elle : il suffit, en effet, de jeter un coup d'œil sur les courbes qui représentent les variations de ces courants telluriques, et en regard sur les courbes magnétiques correspondantes pour voir que les courants telluriques ont tous les caractères de courants induits ⁽³⁾ : ils sont d'autant plus intenses que les *variations* des mouvements de l'aiguille aimantée sont plus *brusques*, et ils n'ont aucun rapport comme intensité avec l'*amplitude* des mouvements de l'aiguille. M. Ellis était déjà arrivé à cette conclusion par l'étude détaillée des courbes telluriques de Greenwich ⁽⁴⁾, c'est-à-dire que, pas plus pour les per-

(1) RIGHI, *Rend. della R. Ac. dei Lincei*, 7 novembre 1897; *Rend. della R. Ac. di Bologna*, 29 mai 1898.

(2) SCHMIDT, *Meteorologische Zeitschrift*, t. XVI, 1899, p. 385-397.

(3) C'est aussi à cette conclusion qu'étaient déjà arrivés B. Stewart (*Philos. Trans.*, 1861) et le P. Secchi, qui a constaté (voir *Comptes rendus*, t. LXXV, p. 1638) « que lorsque les mouvements des appareils magnétiques se prolongent aux époques des perturbations et lorsque ces mouvements arrivent *sans secousses*, le galvanomètre n'accuse pas la présence de courants telluriques ».

(4) W. ELLIS, *Proc. Royal Society*, t. LII, p. 191-212.

turbations que pour la période diurne, les courants telluriques ne sont l'agent des variations de l'aiguille aimantée; mais ils sont induits par cet agent.

Enfin, notre conception explique, semble-t-il, simplement, l'allure hachée et irrégulière des courbes au moment des perturbations, qui montre que l'aiguille aimantée est animée de mouvements successifs, irréguliers, se suivant fréquemment en sens inverse dans l'espace de quelques minutes : l'intensité des ondes hertziennes émises lors d'une perturbation solaire doit être en effet très variable comme celle des décharges électriques produites par cette perturbation; selon que ces ondes sont plus ou moins intenses, elles pénètrent plus ou moins profondément, avant d'être absorbées, dans l'atmosphère supérieure, et, rencontrant des couches successives où la direction des mouvements de convection diffère, il s'ensuit que la direction et le sens des courants électriques, dont l'intensité subitement accrue agit sur l'aiguille aimantée, peuvent eux-mêmes varier rapidement. Cet effet, combiné avec celui des courants induits dans la Terre (et dont le professeur Lamb a, comme nous l'avons vu, étudié mathématiquement les effets), suffit, semble-t-il, à expliquer clairement l'allure tourmentée et si particulière des courbes, pendant les perturbations magnétiques.

C. — Effets magnétiques des éclipses de Soleil.

Les phénomènes dont nous allons dire maintenant quelques mots sont loin d'être connus et régulièrement observés comme ceux que nous venons d'étudier. Nous ne possédons encore, au sujet des effets magnétiques des éclipses, que très peu de documents, pour la plupart incomplets, car ce n'est qu'exceptionnellement que, lors des éclipses de Soleil, on a songé à étudier cette question, qui est pourtant d'un si haut intérêt pour la météorologie cosmique. Mais si les observations sont, sur ce point, encore trop peu nombreuses pour que l'on ne doive pas considérer comme prématuré d'établir une théorie générale de ces phénomènes, il nous a paru, d'autre part, que nous ne devions négliger aucun ensemble de faits de nature à nous éclairer sur la valeur de notre conception des diverses variations magnétiques; et c'est uniquement à ce point de vue que nous voulons ici esquisser cette rapide étude.

Nous avons vu, à propos de la période diurne, qu'on ne peut douter que celle-ci soit due à des courants électriques circulant dans l'atmosphère. Si donc notre conception du rôle du Soleil est exacte (et nous avons vu comment, grâce à elle, on conçoit la possibilité même de pareils courants, et comment elle relie entre eux et explique tous les caractères et les variations de la période diurne), il doit, lorsqu'une éclipse totale de Soleil intercepte en un lieu les rayons solaires, se produire, *toutes choses égales d'ailleurs*, les phénomènes suivants :

1° L'aiguille aimantée qui, en ce lieu, est à ce moment dans une certaine

position de sa course diurne, doit tendre à revenir à sa position moyenne. Ainsi, en un lieu de notre hémisphère où l'aiguille de déclinaison atteint en moyenne sa plus grande élongation orientale vers 8^h 30^m du matin, sa position moyenne vers 11^h et sa plus grande élongation occidentale vers 2^h de l'après-midi, l'effet de l'éclipse doit être de donner à l'aiguille, vers 8^h 30^m du matin, un mouvement vers l'ouest, et à 2^h de l'après-midi un mouvement vers l'est.

2° La grandeur de l'effet doit dépendre de l'heure de l'éclipse et être proportionnelle à l'élongation par rapport à sa position moyenne que possède l'aiguille à ce moment de sa course diurne. L'effet doit donc être sensiblement nul vers 11^h, quand l'aiguille occupe sa position moyenne, et il doit être maximum vers 8^h 30^m du matin et 2^h du soir. De plus, il doit être sensiblement plus grand à 2^h du soir qu'à 8^h 30^m du matin, car l'élongation occidentale maxima est plus grande par rapport à la moyenne que l'élongation orientale maxima ; ainsi, au Parc Saint-Maur, la plus grande élongation vers l'est, par rapport à la normale, est en moyenne 2',22, tandis que la plus grande élongation vers l'ouest est 4',68, soit plus du double. C'est donc quand l'éclipse est centrale vers 2^h de l'après-midi qu'elle doit, toutes choses égales d'ailleurs, avoir son plus grand effet.

3° Cet effet doit être variable avec les saisons (plus grand en été qu'en hiver dans notre hémisphère) et avec les années (plus grand lors du maximum que lors du minimum des taches solaires).

4° Il doit être sensiblement nul pour les lieux qui sont en dehors de la ligne de l'éclipse, et plus grand pour ceux qui sont situés au milieu de cette ligne que pour ceux qui sont aux extrémités.

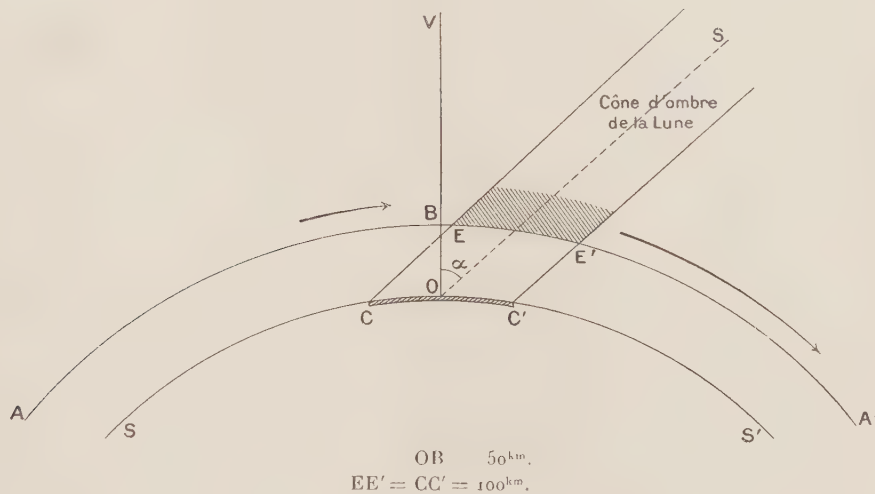
Il convient d'ajouter que ces propositions, déduites immédiatement de notre théorie, ne seraient rigoureusement exactes que si l'on avait toutes choses égales d'ailleurs. Or, il n'en est pas absolument ainsi, car les variations barométriques que l'on a observées souvent pendant les éclipses de Soleil prouvent que, par l'effet de celles-ci, les mouvements de convection de l'atmosphère supérieure peuvent être plus ou moins altérés, ce qui, en changeant le sens des courants électriques qui y circulent, peut modifier dans une certaine mesure les effets que nous venons de décrire. Néanmoins, dans leurs grandes lignes, ceux-ci doivent se produire, si notre conception est exacte, et nous allons voir qu'il en est bien ainsi.

On peut se demander quelle peut être, *a priori*, et dans les conditions les plus favorables, la grandeur des effets observés. On voit facilement que ceux-ci doivent toujours être très faibles.

Dans l'ignorance où nous sommes encore des mouvements de convection de l'atmosphère supérieure, le moment ne nous paraît pas venu de traiter en détail la question par le calcul ; mais nous pouvons géométriquement nous en faire une idée approximative (*fig. 9*). Soit O, un lieu de la Terre qui est au centre de la

zone de totalité au moment d'une éclipse de Soleil. Soit SS' la section de la surface de la Terre par le plan qui contient le parallèle de ce lieu; et supposons pour simplifier que le Soleil se déplace dans ce plan (ce qui a lieu aux équinoxes); soit OV la verticale du lieu et OS la direction du Soleil au moment considéré de l'éclipse, l'angle horaire du Soleil par rapport au méridien du lieu étant alors α . On sait que la résistance électrique de l'air raréfié passe par un minimum quand sa pression est voisine de 1^{mm} . Or, la formule de Laplace nous indique approximativement que les couches atmosphériques dans lesquelles la pression est d'environ 1^{mm} , et dans lesquelles doivent par suite circuler les courants électriques les plus intenses sont à environ 50^{km} du sol. Soit AA' la section de cette région de l'atmosphère par le plan de la figure. D'autre part on sait que la zone dans laquelle l'éclipse est totale a en moyenne une largeur d'environ 100^{km} , et

Fig. 9.



nous pouvons sans erreur sensible considérer ici la portion du cône d'ombre de la Lune qui est entre AA' et SS' comme un cylindre. Au moment de l'éclipse centrale, la portion CC' de la surface de la Terre, et la portion $EE' = CC'$ des couches atmosphériques conductrices, sont soustraites à l'action du rayonnement solaire, ce qui a pour effet, en rendant très petite la conductibilité de cette portion de l'atmosphère (que nous avons indiquée dans la figure par une hachure) d'annuler sensiblement l'intensité des courants électriques qui y circulent. (Dans les régions de l'atmosphère voisines de EE' et où l'éclipse n'est que partielle, l'intensité des courants électriques n'est que partiellement diminuée, et cela d'autant moins qu'elles sont plus éloignées de la zone de totalité, jusqu'aux points où, l'éclipse étant nulle, les courants électriques ne sont pas altérés; pour simplifier cet exposé, nous ne considérerons comme altérée que la région EE' où l'éclipse est totale.)

Or, l'élongation de l'aiguille aimantée est produite à chaque heure du jour par la résultante, ou l'intégrale des actions exercées sur elle par les courants électriques des diverses parties de AA'; ces courants électriques ont, toutes choses égales d'autre part, leur plus grande intensité dans les régions de l'atmosphère qui ont le Soleil au méridien. Donc, sur la figure, l'intensité des courants atmosphériques croît rapidement dans la direction indiquée par les flèches et jusqu'au point où l'angle horaire du Soleil est nul.

Il s'ensuit immédiatement, comme le montre la figure :

1° Que l'éclipse n'a pour effet d'annuler qu'une très petite portion des courants électriques dont l'effet général produit la période diurne de l'aiguille;

2° Qu'en outre, ces courants électriques, ainsi annulés par l'éclipse, sont loin, lorsque l'éclipse n'a pas lieu vers midi, d'être les plus intenses; c'est-à-dire que les courants dont l'effet est prépondérant sur l'aiguille aimantée ne sont alors pas sensiblement affectés; d'autre part, quand l'éclipse a lieu au voisinage du passage du Soleil au méridien, ce qui semblerait favorable à un effet plus grand, nous avons vu que l'aiguille de déclinaison est voisine de sa position moyenne.

Pour toutes ces raisons, on doit donc s'attendre à ce que les effets magnétiques d'une éclipse soient toujours très faibles; même dans les conditions les plus favorables, *ces effets ne doivent pas produire de variation de l'aiguille aimantée supérieure à une fraction de son élongation diurne au moment de l'éclipse.*

Examinons maintenant si les résultats de l'observation sont ou non conformes aux principes très simples que nous venons d'établir.

Il semble que les quelques auteurs et notamment le P. Denza, qui ont discuté les observations magnétiques faites pendant les éclipses, ont négligé de s'entourer, dans cette discussion, de précautions élémentaires. Nous avons dit, à propos des perturbations magnétiques, que leur amplitude (même lorsqu'elles sont considérées comme très faibles) dépasse fréquemment de beaucoup l'amplitude totale de la période diurne. L'examen des courbes magnétiques a montré qu'il se produit en moyenne chaque jour en un lieu donné (Saint-Maur par exemple) plus de trois perturbations dépassant 2' en amplitude, c'est-à-dire qu'il s'en produit en moyenne une toutes les huit heures. Comme d'autre part les différentes phases d'une éclipse solaire en un lieu où elle est totale durent environ 3 heures, on voit qu'il y a plus d'une probabilité contre deux pour que, au moment d'une éclipse, on observe une perturbation de la déclinaison absolument indépendante de l'éclipse et d'une amplitude égale au quart environ, c'est-à-dire une fraction notable, de l'amplitude diurne totale. Il y a donc là une grave cause d'erreur dont le P. Denza n'a tenu aucun compte. Il nous semble que deux conditions indispensables doivent être réalisées pour pouvoir réellement attribuer un effet magnétique observé pendant une éclipse, à celle-ci : 1° Il faut que la perturba-

tion ait été observée, et avec les mêmes caractères, dans plusieurs stations situées dans la zone de l'éclipse; 2° Il faut que dans les stations situées en dehors de cette zone on n'ait observé aucun effet, ou du moins qu'un effet très atténué. Or, il n'y a que quatre éclipses de Soleil pendant lesquelles on ait ainsi fait des observations simultanées dans plusieurs stations éloignées; ce sont les éclipses : 1° du 22 décembre 1870; 2° du 12 décembre 1871; 3° du 28 mai 1900; 4° du 18 mai 1901. Seules ces observations sont donc susceptibles d'être discutées, et nous ne pouvons tenir aucun compte des observations isolées qui ont été faites par un seul observateur lors d'une ou deux autres éclipses; et quoiqu'en général les effets observés aient été, dans ces observations isolées, favorables à notre théorie⁽¹⁾, nous n'en parlerons pas, car rien ne prouve, comme nous venons de le dire, qu'ils n'étaient pas complètement indépendants de l'éclipse elle-même. Les observations que nous pouvons discuter en toute rigueur sont donc très restreintes. Mais, avant de les examiner, nous allons dire un mot des travaux du P. Denza sur la question.

Le P. Denza a fait pendant une douzaine d'années (de 1870 à 1882) des observations de l'aiguille de déclinaison à l'observatoire de Montcalieri, à l'occasion de toutes les éclipses (soit une vingtaine) qui ont eu lieu pendant cet intervalle, qu'elles fussent totales ou non et visibles ou non en Europe. Il a publié à diverses reprises les résultats de ces observations, et les a discutés en 1883⁽²⁾. Mais il ne nous semble pas possible d'attacher un poids quelconque à ses conclusions; sa discussion pêche par la base pour plusieurs raisons : 1° Le P. Denza n'a discuté en général que les observations faites à la seule station de Montcalieri et, sans avoir l'idée de les comparer à celles faites en d'autres endroits, ce qui eût été une précaution indispensable; 2° Il a dans sa discussion accordé le même poids aux observations faites pendant les éclipses visibles à Montcalieri et celles qui y étaient invisibles; or, nous avons montré plus haut que les effets magnétiques des éclipses ne peuvent être sensibles que dans la zone où l'éclipse est visible; 3° Il n'a tenu aucun compte dans sa discussion de l'heure de l'éclipse, qui est pourtant, comme nous venons de le voir, un facteur essentiel de la grandeur et du sens des phénomènes magnétiques qui peuvent être produits par les éclipses; il a comparé les phénomènes observés par lui uniquement aux phases astronomiques et à la grandeur des éclipses correspondantes sans tenir compte de la distance de Montcalieri à la zone de visibilité de l'éclipse.

On conçoit facilement que, dans ces conditions, le P. Denza n'ait pu déceler

(¹) Telles sont les observations de M. Moise Lion (*Comptes rendus*, 1852), et les conclusions que M. Michéa a déduites de l'étude des courbes de Greenwich (*Comptes rendus*, t. LXXIV, p. 199-200) et celles de Schiaparelli [*Fort. der Physik* (3), p. 833].

(²) Voir *Comptes rendus*, t. XCVI, p. 1575-1570.

aucun accord net entre les déviations de l'aiguille et les diverses phases astronomiques des éclipses. Il y a même une grande probabilité, comme nous l'avons indiqué, pour que la plupart des perturbations attribuées par lui à des éclipses en aient été absolument indépendantes.

Il nous est donc impossible, en toute rigueur, de considérer comme valables les conclusions du P. Denza. Il en est une cependant, en quelque sorte négative, que nous voulons rappeler, à savoir : que les anomalies observées par lui dans la déclinaison pendant les éclipses ne se distinguent pas comme importance de celles qu'on constate journellement. Ceci est bien d'accord avec ce que nous avons établi ci-dessus, à savoir : que les effets magnétiques des éclipses ne doivent pas dépasser une faible fraction de l'amplitude diurne.

Arrivons maintenant aux observations faites pendant les quatre éclipses indiquées plus haut, et qui seules ont été faites dans des conditions permettant d'attribuer sans conteste aux éclipses les effets observés, et seules, par suite, se prêtent à une discussion rigoureuse.

1. *Éclipse totale du 22 décembre 1870.* — Pendant cette éclipse, qui fut totale en Sicile et partielle dans le reste de l'Italie, les instruments magnétiques ont été observés en Sicile, à Terranova, par M. Damilla Muller, et à Naples, Florence, Bologne, Gênes et Montcalieri. Terranova se trouvait au centre de la zone de visibilité de l'éclipse, et exactement au milieu de la ligne de totalité, conditions favorables, comme nous l'avons établi, à la production d'un effet notable. De plus, la totalité avait lieu à 2^h de l'après-midi, c'est-à-dire, comme nous l'avons montré plus haut, à l'heure où, toutes choses égales d'ailleurs, l'effet magnétique doit être maximum. Toutes les circonstances concouraient donc ici, si notre conception est juste, pour qu'un effet relativement grand fût observé; et si nos prémisses sont exactes, cet effet devait consister en un mouvement rétrograde de l'aiguille vers sa position moyenne, par rapport à son elongation diurne habituelle en ce moment.

Or, c'est point pour point ce que M. Damila Müller a observé. Voici d'ailleurs comme il a décrit lui-même son observation (1) :

« Pendant les heures de l'éclipse l'aiguille aimantée aurait dû, en suivant sa marche régulière constatée pendant vingt jours consécutifs, se trouver dans sa période ascendante, c'est-à-dire que la déclinaison devait augmenter de l'est à l'ouest jusqu'à son maximum vers 2^h de l'après-midi. Au lieu de cela, aussitôt constaté le premier contact de la Lune et du Soleil, le mouvement ascensionnel de l'aiguille s'arrêta, rebroussa chemin, et la valeur de la déclinaison diminuant au fur et à mesure que le disque du Soleil s'éclipsait, on arriva au

(1) *Comptes rendus*, t. LXXIII, p. 575-576.

minimum de la déclinaison à 1^h58^m , juste au moment de la totalité de l'éclipse, quand l'aiguille aurait dû être à son maximum. »

A partir de ce moment jusqu'au dernier contact, c'est-à-dire au fur et à mesure que le Soleil reparaisait, commença de nouveau le mouvement ascensionnel de l'aiguille qui, à la fin de l'éclipse, se retrouva exactement dans la même position qu'elle avait abandonnée au commencement du phénomène. Les mêmes phénomènes ont été constatés dans toute l'Italie. De plus, si notre conception est exacte, l'amplitude de cette interversion de la marche ordinaire de l'aiguille devait être d'autant plus faible, toutes choses égales d'ailleurs, qu'on s'éloignait davantage de la ligne de totalité (1). Or c'est rigoureusement ce qui a été constaté. Voici en effet l'amplitude des déviations de l'aiguille observées dans ces différentes stations, en regard de la grandeur de l'éclipse :

Stations.	Grandeur de l'éclipse.	Déplacement de l'aiguille observé.
Terranova	1,000	7.49"
Naples.....	0,949	6.05
Rome.....	0,928	4.10
Florence.....	0,900	3.45
Bologne.....	0,899	3.39
Livourne.....	0,891	4.00
Montecalieri.....	0,877	3.27

D'autre part on n'a pas signalé aux heures de l'éclipse qu'on ait observé des variations analogues dans des stations éloignées de la zone de visibilité, et ceci encore, notre théorie permettait de le prévoir.

2. *Éclipse totale du 12 décembre 1871.* Pendant cette éclipse qui fut visible dans l'Asie méridionale et les îles de la Sonde, des observations magnétiques ont été faites à Batavia, à Buitensborg (Java) où elle était totale, ainsi qu'à Trevandrum dans l'Inde et à Stonyhurst (Angleterre) où elle était invisible.

Ici encore, nous allons d'abord essayer d'établir *a priori*, à l'aide des principes que nous avons déduits de notre conception, quels ont pu être les effets magnétiques observés ; puis nous comparerons nos prévisions théoriques aux résultats de l'observation.

A Trevandrum, où les instruments magnétiques ont été observés par M. Broun (2), l'éclipse avait lieu peu après le lever du Soleil, entre 6^h35^m du matin et 8^h45^m . Trevandrum se trouvait au voisinage de la ligne centrale de l'éclipse, mais tout à l'extrémité de cette ligne, et non loin de la zone où l'éclipse

(1) *Comptes rendus*, t. LXXIV, p. 200.

(2) *Comptes rendus*, t. LXXV, p. 443-446.

cessait d'être visible. Dans ces conditions, si nos principes sont exacts, l'effet magnétique de l'éclipse ne devait affecter qu'une fraction minime de l'élongation de l'aiguille au moment de l'éclipse; d'autre part cette élongation, par rapport à la position moyenne, était elle-même minime à ce moment. En effet, dans l'Inde ⁽¹⁾, au mois de décembre, la déclinaison n'est qu'à 0°3 à l'ouest de sa position moyenne à 6^h du matin et à 0°3 à l'est de cette position à 8^h30^m, c'est-à-dire que précisément l'aiguille passait par sa position moyenne au moment de l'éclipse. Pour cette raison, comme nous l'avons établi, l'effet magnétique à Trevandrum a dû être sensiblement nul. Or c'est précisément ce que les observations de M. Broun démontrent ⁽²⁾.

Batavia et Buitensborg se trouvaient plus près du centre de la zone de visibilité que Trevandrum; de plus les deux stations étaient peu éloignées (à moins de 100^{km}) de la ligne centrale. A Buitensborg l'éclipse était totale; à Batavia elle ne l'était pas tout à fait, sa grandeur étant 0,992.

Il résulte du rapport du Dr Bergsma ⁽³⁾ qui a fait les observations à Batavia que la marche de l'aiguille aimantée à Buitensborg a été la même pendant l'éclipse qu'à Batavia.

Nous ne nous occuperons donc que de cette dernière station, dont seules les observations ont été publiées. A Batavia l'éclipse avait lieu entre 9^h6^m du matin et 12^h4^m, la plus grande phase étant à 10^h28^m. Or à Batavia au mois de décembre ⁽⁴⁾ l'aiguille de déclinaison passe précisément par sa position moyenne entre 9^h et 12^h, et, à 10^h30^m, elle n'est qu'à 0°,9 à l'ouest de celle-ci ⁽⁵⁾. Si notre conception est exacte, il résulte de ces circonstances : 1° que l'éclipse n'a dû avoir d'effet sensible qu'au voisinage de la plus grande phase, c'est-à-dire aux environs de 10^h30^m; 2° que cet effet n'a pu dévier l'aiguille que d'une quantité bien inférieure à 0°,9 puisque l'éclipse n'était même pas totale; 3° que cet effet devait produire, puisque l'aiguille à cette heure se trouve en moyenne à l'ouest de sa position normale, une légère déviation vers l'est.

Or c'est exactement ce que l'observation a montré. Si l'on se reporte au rapport du Dr Bergsma on voit, en effet, qu'à 10^h10^m l'aiguille qui était d'une très petite quantité à l'ouest de sa position normale moyenne passe à l'est de celle-ci, et atteint par rapport à celle-ci une élongation maxima vers l'est de 0°,57 (c'est-à-dire relativement très faible) à 10^h25^m, puis se rapproche de nouveau de la

(1) *Magnetical observations made at the government observatory Bombay.*

(2) *Loc. cit.*

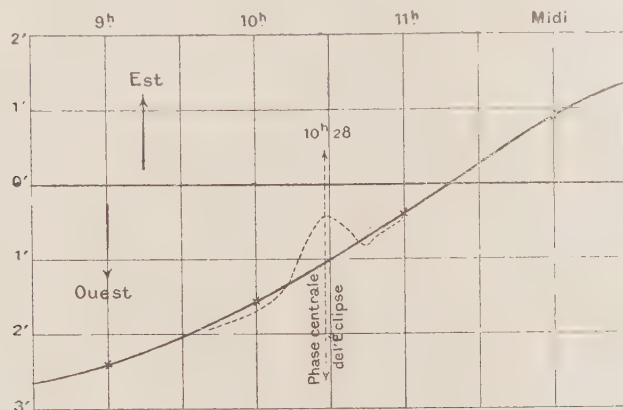
(3) *Comptes rendus*, t. LXXIV, p. 1465-1468.

(4) *Observations made at the observatory, at Batavia, published by order of the government of Netherland India*, Vol. I.

(5) Il s'agit du pôle nord de l'aiguille dont la course diurne est inverse dans l'hémisphère sud de ce qu'elle est dans notre hémisphère.

normale, la traverse vers 10^h 40^m, et la côtoie ensuite quelque temps à l'ouest, La courbe ci-contre représente à une très grande échelle ces résultats. On voit que l'élongation maxima vers l'est a atteint sa plus grande valeur au moment précis (à 3^m près) où l'éclipse était dans sa plus grande phase. Les courbes ci-jointes (*fig. 10*) ont été construites à l'aide des nombres du D^r Bergsma.

Fig. 10.



La courbe en trait plein représente l'allure normale de l'aiguille de déclinaison à Batavia, en décembre.

La courbe en pointillé représente les observations faites pendant l'éclipse.

L'abscisse O' correspond à la position moyenne de l'aiguille.

A Stonyhurst (Angleterre), où l'éclipse n'était pas visible, M. Perry (¹) n'a rien observé de particulier dans la marche régulière de la déclinaison, et cela encore notre théorie permettait de le prévoir.

Ainsi grâce à quelques règles simples déduites de celle-ci, la conclusion du D^r Bergsma, à savoir : que les variations extraordinaires de l'aiguille aimantée, observées en Italie le 22 décembre 1870, ne se sont pas répétées à Java pendant l'éclipse de 1871, conclusion qui, dans l'esprit de son auteur, avait une portée dubitative et même en quelque sorte négative, nous apparaît parfaitement conforme à ce qu'on pouvait prévoir. Nous avons pu indiquer en effet, *a priori*, que les effets magnétiques de l'éclipse de 1870, en Italie, devaient nécessairement être beaucoup plus grands que ceux de l'éclipse de 1871 à Java ; nous avons même pu théoriquement prévoir le sens et la grandeur respectifs des effets magnétiques, exactement tels qu'ils ont été observés dans toutes les stations lors de ces deux éclipses.

3. *Éclipse totale du 28 mai 1900.* — Sur l'initiative du D^r Bauer, de la *U. S. Geodetic Survey*, des observations magnétiques ont été faites pendant cette

(¹) *Nature*, t. V, p. 629.

éclipse (qui fut visible aux États-Unis), dans six stations différentes de ce pays dont trois étaient situées dans la zone de totalité et trois très près de cette zone entre l'État d'Alabama et le Maryland (¹). Dans toutes ces stations on a observé l'aiguille de déclinaison dont les variations ont été aussi enregistrées automatiquement.

Suivant la même méthode que précédemment, nous allons d'abord, à l'aide des règles déduites de notre conception, essayer d'établir théoriquement ce qu'ont dû être les effets magnétiques observés. Nous comparerons ensuite nos prévisions théoriques avec les résultats de l'observation.

Pour les différentes stations la plus grande phase de l'éclipse se produisait à des moments variés, mais tous compris entre 8^h et 9^h du matin, c'est-à-dire à l'heure où, dans ces régions, l'aiguille de déclinaison, ayant déjà dépassé sa plus grande elongation orientale, se rapproche de nouveau rapidement de sa valeur moyenne (tout en étant encore à l'est de celle-ci). Par conséquent, l'effet de l'éclipse tendant à ramener l'aiguille à sa position moyenne *a dû être une oscillation de l'aiguille vers l'ouest*. Mais nous pouvons aller plus loin, et nous demander quelle a été l'amplitude de cette oscillation due à l'éclipse. Nous avons vu qu'à Batavia, lors de l'éclipse de 1871, lorsque l'elongation de l'aiguille par rapport à sa position moyenne était environ 1', la variation maxima produite par l'éclipse avait été 0',5, tandis qu'en Sicile, en 1870, la variation due à l'éclipse avait été de plusieurs minutes, l'elongation de l'aiguille ayant elle-même à ce moment sa plus grande valeur diurne, et ceci a été trouvé conforme avec la règle établie plus haut, à savoir : que la variation produite par l'éclipse doit être d'autant plus marquée, toutes choses égales d'ailleurs, que l'elongation de l'aiguille est elle-même plus grande. Si cette règle est exacte, comme on sait que vers 8^h à 9^h du matin l'elongation moyenne de l'aiguille est environ 2' par rapport à la moyenne diurne, dans la région des États-Unis où l'on observait, il s'ensuivra que le déplacement de l'aiguille occasionné par l'éclipse a dû y être, tout en restant très faible et bien inférieur à l'effet observé en Sicile, légèrement supérieur à l'effet observé à Batavia, c'est-à-dire plus grand que 0',5 et plus petit que 4'. Or, c'est rigoureusement ce qui, point pour point, a été observé; en effet :

1° En ce qui concerne le sens et la nature des déplacements observés, il résulte d'une discussion approfondie de toutes les observations faites par le Dr Bauer (²) : que dans toutes les stations on a observé et aussi enregistré automatiquement une petite oscillation de la déclinaison, dont les diverses phases n'ont pas eu lieu dans les 6 stations au même moment absolu

(¹) *Nature*, t. LXIV, p. 15-16; *Annual Report of the U. S. Geodetic Survey for 1900*.

(²) *Atmospheric Electricity and terrestrial Magnetism*, 1902.

ou local, mais partout ont été simultanées avec le maximum d'obscuration, et que cet effet a consisté en *une déviation de l'aiguille vers l'ouest par rapport à sa position normale*, suivie d'un retour progressif vers celle-ci après la phase principale de l'éclipse.

2° En ce qui concerne la grandeur de cette déviation, il résulte du rapport du Dr Bauer (1) que l'amplitude en a été trouvée égale à 1' (et nous avons prévu qu'elle devait être plus petite que 4' et plus grande que 0',5).

D'ailleurs on n'a signalé dans les stations situées en dehors de la zone de visibilité de l'éclipse aucun phénomène analogue, conformément à ce que nous pouvions prévoir.

4. *Éclipse du 18 mai 1901.* — C'est encore sur l'initiative du Dr Bauer que, pendant cette éclipse, on a fait des observations magnétiques, et cela dans un grand nombre de stations situées tant sur la zone de visibilité qu'en dehors de celle-ci.

Or, à aucune des stations situées hors de la zone de visibilité, on n'a observé la moindre variation anormale des instruments magnétiques (1). Des observations ont été faites dans la zone de totalité à trois stations : 1° à l'île Maurice (au moyen des enregistreurs qui y fonctionnent régulièrement); 2° à Karang-Sago, par le Dr van Boemmelen; 3° à Sawah Loento (Sumatra), par M. Hosmer (dans ces deux dernières stations, par l'observation directe); enfin, à Batavia, en dehors de la zone de totalité.

Recherchons de nouveau théoriquement, à l'aide des règles établies ci-dessus, quels ont pu être les effets magnétiques de l'éclipse en ces différents lieux.

A Maurice, où l'éclipse se produisait peu après le lever du Soleil, les conditions étaient défavorables à la manifestation d'un effet notable, car la station d'observation se trouvait presque à l'extrémité de la ligne de totalité. D'autre part, la totalité avait lieu vers 7^h 50^m du matin (temps local), c'est-à-dire précisément à l'heure où les éléments magnétiques sont sensiblement à leur position moyenne. En effet, dans ces latitudes australes et en été, la déclinaison est en moyenne à 7^h, à 0', 2 à l'ouest de la moyenne, et à 8^h, à 0', 3 à l'est de celle-ci, c'est-à-dire qu'elle passait par sa valeur moyenne entre 7^h et 8^h. Donc, l'effet maximum produit par l'éclipse ne pouvait excéder une amplitude bien inférieure à 0', 2; comme d'autre part, dans les courbes de l'enregistreur Addie employé à Maurice, 0', 2 ne correspond qu'à 0^{mm}, 2 d'ordonnée, c'est-à-dire à quantité pour ainsi dire inappréciable sur les courbes où le trait n'a jamais moins de 0^{mm}, 5 lui-même et est, comme nous l'avons dit, assez irrégulier, il

(1) *Nature*, t. LXV, p. 246.

s'ensuit qu'on n'a rien dû constater d'anormal, au moment de l'éclipse, sur la courbe de Maurice. C'est en effet ce que M. Claxton a constaté. D'autre part, la composante horizontale comme la déclinaison passe à cette saison par sa valeur moyenne entre 7^h et 8^h du matin, c'est-à-dire que cette courbe non plus n'a pas dû manifester, lors de l'éclipse, d'irrégularités plus grandes que celles que montrent les courbes, même les plus calmes, pour ainsi dire à chaque heure de la journée. C'est bien encore ce que M. Claxton a constaté ⁽¹⁾.

Les observations faites à Karang-Sago par l'expédition hollandaise n'ont pas encore été publiées. Nous ne pouvons donc les discuter ⁽¹⁾.

A Sawah Loento, M. Hosmer, de l'expédition américaine, a observé pendant l'éclipse l'aiguille de déclinaison ⁽²⁾. Dans cette station, située presque à la limite de la zone de totalité, celle-ci avait lieu vers 12^h 30^m. Voici ce que prévoit dans ce cas notre théorie : comme il n'y a jamais eu à Sawah Loento, en dehors de l'époque de l'éclipse de 1901, d'observations régulières de la déclinaison ; comme, d'autre part, cette station est située entre le parallèle de Singapore et celui de Batavia, et qu'à Singapore comme à Batavia l'aiguille de déclinaison, dans sa marche diurne, dépasse sa position moyenne à midi et se dirige ensuite vers l'est, nous sommes légitimement en droit d'inférer qu'il en est normalement de même à Sawah Loento. Donc, au moment de la totalité, l'aiguille devait avoir dans cette station une certaine élongation orientale, par rapport à la moyenne et l'éclipse a dû tendre à la ramener vers celle-ci, c'est-à-dire lui donner une déviation vers l'ouest. Or, c'est précisément ce qu'a observé M. Hosmer : il a constaté qu'au moment de la totalité la déclinaison (qui est orientale dans cette région) était diminuée d'environ 1' par rapport à sa position habituelle, observée les jours précédents à cette heure.

A Batavia, si notre conception est exacte, comme l'éclipse n'était que partielle (et se produisait à peu près au même moment qu'à Sawah Loento), on a dû observer le même effet, mais atténué : c'est précisément ce qu'on a constaté ⁽³⁾.

Enfin, dans les observatoires situés en dehors de la zone de visibilité, on n'a rien observé d'analogue, comme nous pouvions le prévoir.

En résumé, nous avons pu, grâce à quelques principes fort simples déduits immédiatement de notre conception du rôle du Soleil dans les diverses variations magnétiques, non seulement expliquer et coordonner entre eux les effets magné-

⁽¹⁾ *Loc. cit.*

⁽²⁾ *Ibid.*, p. 247.

⁽³⁾ *Loc. cit.*

tiques des éclipses (qui semblaient, malgré le nombre restreint des faits d'observation, si variés, si confus même et presque contradictoires), mais nous avons pu prédire, en quelque sorte dans tous les cas, que les phénomènes devaient être nécessairement tels qu'on les a réellement observés.

Et il semble que ceci apporte une certaine force à notre théorie.



CHAPITRE V.

SUR LES AURORES BORÉALES.

A.

Les nombreux matériaux d'observation accumulés au sujet *Aurores boréales* et qui ont pris surtout un grand caractère de précision grâce aux nombreuses expéditions polaires qui se sont succédé depuis une trentaine d'années, ont fait que, depuis quelques années, l'étude de ces phénomènes est entrée dans cette phase spéciale de toute science expérimentale, où l'esprit éprouve le besoin de coordonner et d'expliquer par une synthèse théorique, en en recherchant la cause première, les résultats de l'observation.

La liaison qui, sur bien des points, rattache les Aurores boréales aux perturbations magnétiques a été la base de toutes les théories proposées qui ont, sans exception, soit rattaché à une même origine commune ces deux catégories de phénomènes, soit considéré les premiers comme la cause productrice des seconds ou inversement.

Mais, avant d'examiner ces diverses théories et d'exposer la contribution personnelle que nous avons voulu leur apporter, nous allons sommairement récapituler les faits principaux résultant de l'observation, en laissant de côté tous ceux qui n'ont pas un caractère de certitude absolue et dont l'existence ou la nature exacte sont encore douteuses (tels sont par exemple les faits relatifs à une prétendue odeur ou au bruit des *Aurores boréales*). Nous nous bornerons d'ailleurs à un exposé très succinct, en renvoyant pour plus de détails, et quand ce sera nécessaire, aux Mémoires originaux des observateurs.

a. Formes des Aurores boréales. — Parmi les formes innombrables et variées qu'affectent les Aurores boréales, on a depuis longtemps distingué certains types de structure auxquels peuvent se ramener toutes les apparences observées; ce sont :

1° Les *Bandes*, phénomènes irréguliers très variables dans leur forme, laissant l'impression d'une bande allant à la dérive dans l'atmosphère, en général plus longue que large et souvent recourbée en plis et en draperies; ces bandes, qui peuvent s'étendre dans n'importe quelle direction, paraissent formées de rayons

pressés les uns contre les autres, dont les intervalles sont remplis de matière lumineuse. Dans ces bandes, les rayons distincts sont développés parallèlement aux lignes de force magnétique, et le plus souvent dans le sens du zénith, de telle sorte que l'extrémité inférieure des bandes est assez bien délimitée, tandis que l'extrémité supérieure est moins nette et se fond peu à peu dans le ciel;

2° Les *Arcs*, phénomènes en relation intime avec les bandes, affectant à peu près la forme de l'arc-en-ciel, dont les mouvements varient rapidement et d'où s'élancent, comme dans les bandes, des rayons qui leur donnent comme aux bandes une apparence bien délimitée vers le bas et estompée en haut;

3° Les *Rayons* isolés les uns des autres, plus ou moins rapprochés et qui, orientés dans la direction du zénith magnétique, paraissent converger vers celui-ci et forment quelquefois autour de lui une sorte de gloire ou couronne;

4° Enfin, des *Lueurs* assez nettes, de formes plus ou moins bien définies et qui, fréquemment, offrent l'apparence de nuages.

Ces différentes formes coexistent fréquemment dans une même Aurore boréale et sont animées, en général, de mouvements et de variations d'éclat plus ou moins rapides (1).

b. Extension des Aurores boréales. — Elle est extrêmement variable; dans les hautes latitudes, elles sont des phénomènes purement locaux et qui ne sont aperçus que dans un faible rayon; les diverses expéditions polaires qui, à plusieurs reprises, ont séjourné simultanément dans les régions arctiques, à peu de distance les unes des autres, n'ont constaté, en effet, que rarement des coïncidences dans leurs observations d'Aurores boréales (1); d'autre part, les mesures qu'on a faites de la hauteur des *Aurores* ont fréquemment démontré qu'elles avaient un caractère absolument local, comme nous le verrons.

Au contraire, on peut citer, et surtout aux latitudes plus basses, des *Aurores* qui furent visibles simultanément sur une immense étendue; telles furent les Aurores qui, au début de septembre 1859 (et précisément pendant que se développait la grande tache solaire où Carrington et Hodgson observèrent le phénomène relaté au Chapitre précédent), furent aperçues à la fois dans toute l'Europe et l'Amérique du Nord, sur l'Atlantique, en Afrique et jusqu'à Cuba; telles furent également quelques-unes des Aurores qui se manifestèrent vers le maximum des taches solaires de 1871 et pendant celui de 1892 (2). Ce qu'il y a de plus remarquable dans ces grandes Aurores, c'est qu'elles se produisent souvent simultanément dans les deux hémisphères: ainsi, il résulte des observations (3)

(1) Voir, pour plus de détails, notamment: ANGOT, *Les Aurores polaires*; LEMSTRÖM, *L'Aurore boréale*, etc... passim.

(2) Voir les observations relatées dans *Astronomy and Astrophysics*, 1892.

(3) ANGOT, *loc. cit.*, p. 85, et LEMSTRÖM, *loc. cit.*, p. 31.

que, par exemple, l'Aurore du 4 février 1872 fut observée simultanément dans la plus grande partie de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud, les régions de visibilité n'étant séparées que par une zone comprenant, de part et d'autre de l'équateur, une vingtaine de degrés de latitude.

Enfin, la série des observations d'Aurores faites à Hobarton (Tasmanie) a démontré qu'il ne s'est jamais produit dans l'hémisphère sud une grande Aurore, sans qu'elle soit accompagnée dans l'hémisphère nord d'une autre grande Aurore.

Cette extension considérable de certaines Aurores, qui paraissent ainsi recouvrir presque toute la surface du globe, contraste remarquablement avec l'étendue restreinte des Aurores ordinaires (beaucoup plus nombreuses d'ailleurs) des régions voisines du pôle.

c. Fréquence des Aurores boréales. — A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur vers les pôles, la fréquence des Aurores, c'est-à-dire le nombre moyen de celles qu'on observe annuellement, croît rapidement. Tous les catalogues d'Aurores boréales ont démontré ce fait auquel M. Hermann Fritz, dans le travail le plus complet qui ait été publié sur la question ⁽¹⁾ (et qui embrasse toutes les Aurores observées de 1700 à 1872), a donné une forme précise.

M. Fritz a étudié la répartition géographique des Aurores en pointant sur une Carte les nombres qui, pour chaque pays, représentent la fréquence moyenne et, réunissant ces points par des lignes, il a obtenu des courbes d'égale fréquence, qui sont grossièrement circulaires et concentriques, et dont le centre se trouve entre le pôle magnétique et le pôle de rotation de la Terre. La fréquence moyenne, qui n'est que 0,1 par an le long de la ligne qui passe par l'Algérie, est à Paris un peu inférieure à 4 et un peu supérieure à Berlin; elle est de 6 à Londres, de 9 à Saint-Petersbourg, de 10 à Liverpool et Copenhague; la ligne qui correspond à 30 aurores par an passe en Europe par le nord de l'Irlande, le milieu de l'Écosse, Christiania, la mer Blanche; en s'approchant davantage du pôle, on trouve une ligne qui correspond à un peu plus de 100 aurores par an et au delà de laquelle la fréquence diminue ensuite rapidement. Il existe ainsi une *zone de fréquence maximum des Aurores* de part et d'autre de laquelle leur nombre diminue rapidement. Toute la région au nord de l'Atlantique, dans laquelle hivernent d'ordinaire les expéditions pour la découverte du pôle, l'île Melville, la mer de Baffin, le détroit de Smyth, etc., sont en dedans de cette courbe et à une grande distance; les voyageurs qui ont séjourné dans ces régions, notamment Parry, Ross, Kane, Hayes, Nares, etc., avaient depuis longtemps signalé que les Aurores y sont beaucoup moins fréquentes et moins brillantes que plus au sud, comme en Islande ou au Labrador.

(1) FRITZ, *Verzeichniss beobachteter Polarlichter*. Wien, 1873.

Enfin, au sud de la zone de fréquence maximum, on observe le plus souvent les Aurores dans la direction du nord, et au contraire, en dedans de cette zone, on les observe généralement vers le sud (1).

d. Hauteur des Aurores boréales. — Toutes les mesures effectuées jusqu'à ce jour, des hauteurs des phénomènes auroraux dans les latitudes moyennes, ont conduit sans exception à des nombres très élevés. Quelques réserves que l'on puisse faire sur les méthodes employées, et sur les causes nombreuses d'erreur provenant notamment de l'étendue des rayons auroraux, de leur peu de netteté et de leurs mouvements rapides, il n'en reste pas moins que cette concordance relative de toutes les mesures faites dans les latitudes moyennes (2) nous donne certainement l'ordre de grandeur des altitudes des Aurores dans ces latitudes : toutes indiquent que la partie inférieure des rayons ne descend guère à moins de 60^{km} au-dessus du sol, et que leur partie supérieure s'élève fréquemment à 400^{km} et 500^{km} et plus.

Au contraire, les mesures faites dans les régions arctiques, et notamment lors des expéditions polaires internationales de 1882-1883, ont conduit (2) pour la hauteur des Aurores à des nombres fréquemment plus faibles, compris en général entre 20^{km} et 30^{km} en hauteur et peut-être moins encore.

Ainsi il n'est pas douteux que *la hauteur moyenne à laquelle se produisent les Aurores boréales diminue de plus en plus, à mesure qu'on s'approche des pôles*. On a remarqué en outre que l'extension des Aurores semble présenter une certaine relation avec leur hauteur : les Aurores très étendues qu'on observe aux latitudes moyennes et dans les deux hémisphères simultanément ont toujours indiqué des hauteurs très grandes (2). Au contraire les phénomènes auroraux très bas des régions polaires sont toujours des phénomènes restreints et purement locaux.

e. Orientation des rayons auroraux. — Nous avons dit déjà que les rayons de l'Aurore, soit isolés, soit réunis en arcs, en couronnes ou en draperies, sont à peu près parallèles à l'aiguille d'inclinaison, de sorte que, en vertu de la perspective, le point de concours apparent de ces rayons dans le ciel est sensiblement le zénith magnétique, point où la direction de l'aiguille d'inclinaison rencontre la voûte céleste. Cependant un grand nombre d'observations certaines, celles notamment d'Argelander, de Bravais, etc., ont mis hors de doute que fréquemment le point de convergence des rayons auroraux est passablement éloigné, dans des directions quelconques, du zénith magnétique. Donc, outre la force directrice principale qui donne aux rayons auroraux leur orientation

(1) LEMSTRÖM, *Loc. cit.*

(2) Pour le détail de ces mesures, voir notamment ANGOT, *loc. cit.*

moyenne, et qui agit de même sur l'aiguille aimantée, il paraît exister d'autres forces d'intensité et de direction variables qui altèrent fréquemment cette orientation ⁽¹⁾.

f. Spectre de l'Aurore boréale. — La nature exacte de ce spectre, composé, comme on sait, d'une raie principale verte, caractéristique, et d'un certain nombre d'autres raies plus faibles, semble près d'être exactement connue, grâce aux travaux récents de MM. Paulsen et Scheiner et de M. Ramsay. M. Paulsen a photographié avec le même appareil le spectre de l'Aurore boréale et le spectre de la lumière bleuâtre qui entoure la cathode d'un tube Geissler contenant de l'air, et M. Scheiner, à la suite des mesures soignées et comparatives de ces spectres, a trouvé qu'il y a une coïncidence aussi parfaite que possible entre un grand nombre des raies de l'Aurore et le spectre de l'air à la cathode d'un tube de Geissler ⁽²⁾. D'autre part, M. Ramsay a découvert ⁽³⁾ que la raie verte de l'Aurore, qui jusqu'à ces dernières années avait paru une des particularités les plus mystérieuses de ce phénomène, coïncide exactement avec la raie principale du crypton. On pouvait se demander aussi pourquoi cette raie verte apparaît toujours dans l'Aurore boréale avec une si grande intensité par rapport aux autres raies, étant donné surtout que le crypton n'existe qu'en quantité infime, semble-t-il, dans notre atmosphère. Or, diverses expériences de M. Ramsay ont montré que le spectre du crypton possède une haute visibilité lorsqu'il est mélangé à d'autres gaz, que notamment ce spectre persiste encore même avec une dilution de $\frac{1}{2500000}$ à une pression inférieure à $\frac{20}{1000000}$ d'atmosphère lorsque ce gaz est mélangé avec de l'oxygène, et que de plus la ligne verte du crypton possède une visibilité et une persistance extraordinaires, tandis que les spectres de chacun des autres gaz atmosphériques disparaissent soit en les mélangeant avec d'autres gaz, soit par diminution de pression. S'appuyant sur ces données et appliquant la formule de Laplace, M. Ramsay a calculé de plus, qu'une Aurore boréale produite dans les conditions de raréfaction réalisées dans ces expériences doit être à une hauteur d'environ 150^{km}, ce qui est bien du même ordre que le résultat moyen des observations (*voir ci-dessus*, § *d*).

g. Périodicité des Aurores boréales. — Les diverses variations périodiques de la fréquence des Aurores boréales sont peut-être, de toutes les particularités de ces phénomènes, celles sur lesquelles nous possédons les documents et les données les plus nets; et cependant, leurs causes jusqu'à ces dernières années sont restées complètement ignorées, comme nous le verrons dans la suite de ce Cha-

⁽¹⁾ ANGOT, *loc. cit.*, passim.

⁽²⁾ *Rapports du Congrès de Physique* 1900, t. III, p. 438-444.

⁽³⁾ RAMSAY, *Rev. gén. des Sciences*, 1902, p. 810.

pitre. Les principales de ces périodes de l'Aurore que l'observation a mises en lumière sont les suivantes :

1^o *Période diurne*. — On a depuis longtemps constaté que l'on observe le plus grand nombre des Aurores boréales pendant les premières heures de la nuit et cela, sous toutes les latitudes, aussi bien dans les régions arctiques que dans les stations plus méridionales (¹). Ce n'est pas seulement ce nombre, mais l'intensité des Aurores boréales qui subit cette variation, et la diminution d'intensité des Aurores à mesure que la nuit s'avance a été constamment et depuis longtemps constatée (²).

Et non seulement cette tendance de la fréquence des Aurores à suivre partout le temps local résulte de la moyenne des observations en chaque lieu, mais elle n'est pas moins manifeste quand on considère une Aurore en particulier. Ainsi Donati a montré (¹) que la grande Aurore du 4 février 1872, qui a été vue dans les deux hémisphères, a eu son maximum partout à peu près au même temps local, entre 8^h30^m et 9^h30^m du soir, et non au même instant physique, bien que la différence de longitude des stations extrêmes dépassât 7 heures. A la fin de ce Chapitre nous dégagerons de ces faits les conclusions qui en découlent relativement à la cause de cette période.

2^o *Période annuelle*. — La fréquence des Aurores dans les latitudes moyennes possède une double période annuelle, fort nette et qui se manifeste par deux maxima au moment des équinoxes et deux minima au moment des solstices; dans l'hémisphère nord comme dans l'hémisphère sud.

Cependant cette périodicité annuelle semble se modifier lorsque, s'éloignant des latitudes moyennes, on se rapproche des pôles : le maximum de l'automne retarde alors de plus en plus, tandis que celui du printemps avance et tous deux se rapprochent du solstice d'hiver; lorsqu'on arrive à des latitudes suffisamment hautes près des pôles les deux maxima finissent par se rejoindre en un seul qui tombe vers le solstice d'hiver. Ce fait signalé par Lovering a été vérifié depuis par de nombreux observateurs (³) : les nombreuses séries d'observations recueillies au nord de la mer de Baffin par les expéditions de Parry, Mac Clintock, Kane, Hayes, Bessels, et celles plus complètes encore de Godtaab (Groënland) recueillies d'une manière ininterrompue pendant 17 ans, ne laissent aucun doute à ce sujet.

Ainsi c'est au solstice d'hiver, dans les régions situées à peu de distance du

(¹) ANGOT, *loc. cit.* — ARRHÉNIUS, *loc. cit.*

(²) PAULSEN, *Meteorologische Zeitschrift*, 1894, p. 450.

(³) ANGOT, *loc. cit.*, p. 125.

pôle, que se produit le maximum de la fréquence annuelle, pendant que précisément, dans les latitudes moyennes, se produit un minimum.

3° *Période undécennale.* — Cette période, la plus frappante de toutes peut-être, coïncide exactement avec la période des taches solaires, comme celles des perturbations magnétiques, et de telle manière que les maxima et les minima des trois ordres de phénomènes coïncident (¹).

Nous ne citons enfin que pour mémoire la période douteuse d'environ 26 jours que certains auteurs ont récemment cru trouver dans la fréquence des Aurores. Nous y reviendrons plus en détail dans la seconde Partie de ce travail.

h. Relations des Aurores boréales avec les perturbations magnétiques. — En outre de la double périodicité commune qui relie leur fréquence à celle des taches solaires, il paraît y avoir entre ces deux ordres de phénomènes diverses relations sur lesquelles les observateurs ont spécialement fixé leur attention, et sur lesquelles on possède des documents étendus et précis, depuis quelques années (²). C'est à Upsal, en 1871, que Celsius et Hiorter signalèrent pour la première fois la simultanéité d'une Aurore boréale et de perturbations dans la déclinaison. De 1741 à 1747, Hiorter releva quarante-six exemples de cette coïncidence; des observations furent poursuivies ensuite par Wargentin, Canton et Wilcke, qui trouva ce fait capital et souvent confirmé depuis : que si, presque toutes les fois qu'il se produit des perturbations magnétiques, elles sont accompagnées d'Aurores boréales, on observe en revanche fréquemment des Aurores boréales sans que l'aiguille de déclinaison montre aucune perturbation. Parmi les nombreux observateurs qui ensuite confirmèrent ces faits, citons Van Swinden, Cassini, Gilpin, etc. Bornons-nous à indiquer les principaux résultats obtenus dans quelques-unes des expéditions polaires les plus connues : lors du séjour du *Tegetthof* à la Terre François-Joseph, Weyprecht observa que les Aurores à mouvements lents se produisent d'ordinaire sans que l'aiguille aimantée éprouve la plus petite agitation; au contraire, les perturbations deviennent très intenses pendant les Aurores qui présentent des rayons lumineux à mouvements rapides.

Parry, dans ses hivernages à la presqu'île Melville et à Port-Bowen, ne reconnut *jamaïs* aucune relation entre l'apparition de l'Aurore boréale et les mouvements de l'aiguille aimantée; Mac Clintock, dans deux hivernages consécutifs, ne put observer que cinq fois la coïncidence des deux phénomènes; Kane arriva aux mêmes conclusions : dans ses deux hivernages de 1853 et de 1855 à l'extrême-nord du Groenland, il n'observa *pas une seule fois* de perturbations

(¹) ANGOT, *loc. cit.*; LEMSTRÖM, *loc. cit.*; etc.

(²) Nous avons emprunté à la remarquable étude historique et critique de la question, qui se trouve dans les *Aurores polaires* de M. Angot, un grand nombre des données de ce paragraphe.

magnétiques pendant les Aurores boréales. Bessels, qui séjourna plus au nord encore, avec la *Polaris*, nota des variations de la déclinaison pendant *une seule* Aurore, mais c'était pendant l'Aurore tout à fait exceptionnelle du 4 février 1872 dont nous avons déjà parlé et qui sembla avoir enveloppé la Terre tout entière. De même pendant l'hivernage de la *Discovery* en 1875-1876, au détroit de Smyth, on ne put davantage remarquer de relations d'aucune sorte entre les Aurores et les perturbations magnétiques. Enfin, et pour ne citer plus que les résultats de l'expédition la plus récente, Paulsen ⁽¹⁾, pendant son hivernage en Islande en 1899-1900, a observé que les grandes Aurores tranquilles n'avaient aucun effet sur la position des aiguilles, qui étaient au contraire affectées faiblement par les Aurores très mobiles.

Ainsi, tandis que les grandes Aurores, très étendues et très élevées, des latitudes moyennes, sont en général accompagnées de perturbations magnétiques, les relations entre les deux ordres de phénomènes sont beaucoup moins certaines dans les latitudes élevées où les Aurores ont un caractère local : souvent on y voit des Aurores pendant lesquelles l'aiguille aimantée reste parfaitement tranquille ⁽²⁾. Ce fait est d'autant plus remarquable que les perturbations magnétiques présentent dans les régions polaires une fréquence et une amplitude extraordinaires, quand on les compare à celles des latitudes moyennes. En résumé, il n'y a pas de relation nécessaire entre les Aurores boréales et les perturbations magnétiques dans les régions arctiques, c'est-à-dire précisément dans celles où les perturbations magnétiques sont les plus fréquentes. « Cette conclusion, comme dit M. ANGOT, s'appuie sur un fait indiscutable, *l'absence très fréquemment constatée de perturbations magnétiques pendant les Aurores polaires.* » Nous verrons que ces faits présentent un intérêt capital pour la théorie de la production des Aurores.

i. Relations des Aurores avec les nuages. — Presque tous les observateurs d'Aurores, depuis Tycho-Brahé, ont signalé ces relations. On a trouvé ⁽³⁾ fréquemment : que les bandes de cirrus dans les régions polaires sont fréquemment orientées comme les rayons de l'Aurore ; que souvent, quand une Aurore boréale disparaît le matin, on la trouve remplacée par des bandes de cirrus, et que souvent aussi, après le coucher du Soleil, on observe des rayons auroraux aux places où précisément se trouvaient un moment auparavant des bandes de cirrus ; que souvent l'apparition des Aurores est accompagnée de la formation soudaine de nuages ; qu'enfin, la variation très nette de la fréquence annuelle des cirrus et des halos est, comme l'avait déjà signalé Tycho-Brahé et comme

(1) *Rapports du Congrès de Physique*, t. II, p. 452.

(2) Voir aussi *Meteorologische Zeitschrift*, 1894, p. 450 et passim.

(3) Pour plus de détails, voir ANGOT, *loc. cit.*, passim.

l'ont confirmé des travaux étendus et plus modernes (¹), exactement parallèle à celle des Aurores.

B.

On peut dire de toutes les explications de l'Aurore boréale proposées (²) depuis les recherches fondamentales de A. de la Rive qu'elles ont réussi, dans une certaine mesure, à nous mettre sur la voie des circonstances physiques qui peuvent produire dans l'atmosphère supérieure les apparences lumineuses des Aurores boréales; on a également bien expliqué de diverses manières l'orientation caractéristique des rayons de l'Aurore et la fréquence relativement grande de ces phénomènes près des pôles; en revanche, les relations des Aurores boréales avec les perturbations magnétiques, et leurs périodes si caractéristiques sont restées jusqu'à ces dernières années à peu près inexpliquées, bien que ce soient les plus nets peut-être et les plus sûrement établis de tous les caractères de l'Aurore.

Le grand développement pris ces dernières années par les recherches expérimentales sur les manifestations de l'excitation électrique dans les gaz raréfiés, et les analogies nombreuses trouvées entre les formes de l'énergie cathodique et les apparences des Aurores, ont fait que, dans les deux théories récemment présentées par M. Arrhénius et par M. Birkeland, et qui constituent un immense progrès dans cette voie, on a fait jouer aux rayons cathodiques un rôle prépondérant; d'autre part, l'examen attentif des périodes de l'Aurore, en particulier de la période diurne et de la période undécennale, la relation directe et souvent constatée des manifestations aurorales avec l'activité des taches solaires, la diminution bien constatée de l'intensité des Aurores pendant la nuit, etc., ont conduit irrésistiblement à penser que le Soleil doit jouer un rôle important dans la production de ces phénomènes. Cette seconde idée domine également la théorie de M. Arrhénius et celle de M. Birkeland.

En un mot, c'est grâce à ces deux notions nouvelles : intervention du Soleil, production de phénomènes cathodiques, que ces théories récentes de la formation des Aurores boréales ont pu être considérées comme un pas immense dans l'étude de ces mystérieux phénomènes. Et cependant ces théories, si différentes d'ailleurs l'une de l'autre, peuvent-elles vraiment être considérées comme pleinement satisfaisantes? C'est ce que nous allons essayer d'examiner.

I. — La théorie de M. Arrhénius est basée sur l'hypothèse que le Soleil, par l'effet de la pression de radiation de Maxwell-Bartoli, émet des particules néga-

(¹) Pour plus de détails, voir ANGOT, p. 156, et *Zeitschrift der Oesterreich Gesellschaft für Meteorologie*, t. VII, 1872, p. 209.

(²) Voir dans le Traité de M. Angot l'exposé détaillé et la réfutation des théories anciennes.

tivement chargées, dont le diamètre est de l'ordre du 1000^e de millimètre, qui arrivent en cet état jusqu'à la Terre, et, sous l'influence du rayonnement ultra-violet du Soleil, se déchargent dans l'atmosphère supérieure en produisant des rayons cathodiques. Cette théorie explique bien, comme il ressort des développements de l'auteur (1), un grand nombre des caractères des Aurores, notamment leur orientation, la répartition de leur fréquence, leur période diurne, leur relation avec la formation des nuages, etc. Mais elle paraît soulever un certain nombre d'objections nécessaires.

Il nous paraît, entre autres, difficile d'imaginer comment les particules émises par le Soleil, et soumises d'une façon continue au rayonnement ultra-violet sans cesse renouvelé de celui-ci, pendant tout leur trajet à travers l'immense atmosphère solaire, peuvent arriver jusqu'à la Terre en conservant leur charge négative. M. Arrhénius admet lui-même qu'arrivées au voisinage de la Terre, ces particules se déchargent sous l'influence du rayonnement solaire; mais si l'on réfléchit qu'au moment de leur départ de la surface solaire ces particules sont soumises à un rayonnement au moins 45000 fois plus intense, il paraît difficile de supposer qu'elles soient encore chargées en arrivant à la Terre.

D'ailleurs, si les Aurores boréales étaient produites par le mécanisme qu'indique M. Arrhénius, il semble que leur période undécennale devrait être exactement l'inverse de ce qu'on observe (de telle sorte que la plus grande fréquence des Aurores devrait correspondre au minimum des taches solaires); en effet, nous avons vu (ci-dessus, Chap. II) que la radiation solaire est plus grande lors du minimum que lors du maximum des taches; et l'on sait d'autre part que les rayons coronaux du Soleil (qui, suivant l'opinion même de M. Arrhénius, sont produits par la pression de radiation de cet astre) ont effectivement leur plus grande extension lors des minima des taches (2). Le nombre des particules repoussées du Soleil étant plus grand lors des minima d'activité solaire, la période undécennale des Aurores boréales devrait donc être l'inverse de celle qu'on observe réellement.

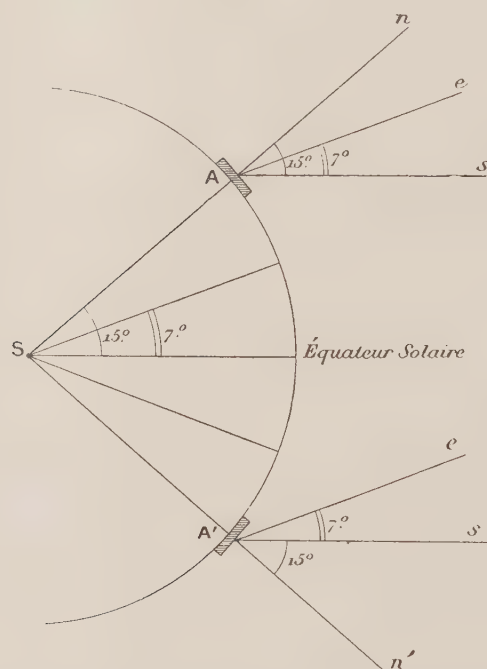
D'autre part, la double période annuelle des Aurores boréales (maxima aux équinoxes, minima aux solstices) s'expliquerait, d'après M. Arrhénius, de la façon suivante : l'activité solaire étant surtout localisée dans deux zones qui se trouvent à 15° de part et d'autre de l'équateur, et la Terre se trouvant le 5 mars et le 3 septembre vis-à-vis des points qui sont respectivement à 7° de l'équateur solaire, tandis que le 6 décembre et le 4 juin elle passe à l'équateur, la Terre recevrait du Soleil plus de particules en mars et en septembre qu'en décembre et en juin (d'après M. Arrhénius). Examinons ce point d'une manière

(1) *Rev. gén. des Sciences*, 1902, p. 65.

(2) Voir ci-dessus, Chap. III.

plus précise : La loi fondamentale du rayonnement d'un élément de surface éclairée ou incandescente est que l'intensité du rayonnement est proportionnelle au cosinus de l'inclinaison de la ligne de vue sur la normale à l'élément. (Cette loi explique qu'un globe éclairé de verre blanc, par exemple, tel que celui d'une lampe, paraît sensiblement également brillant partout, le raccourci de chaque élément de surface par rapport à la ligne de vue compensant juste sa diminution de rayonnement.) La plupart des astronomes (Vogel et Pickering notamment) admettent cette loi fondamentale pour la surface du Soleil. Si nous rappelons que, selon M. Arrhénius, la répulsion des particules solaires est due au rayonnement de l'astre et est proportionnelle à ce rayonnement, nous pou-

Fig. 11.



Dans ce schéma les valeurs des angles sont notablement exagérées, pour la clarté de la figure.

vons faire le raisonnement suivant. Pour plus de simplicité, nous supposerons les régions de l'activité solaire réduites à leur partie centrale; nous n'examinerons que l'effet produit par ces régions (au-dessus desquelles, d'après M. Arrhénius, se trouve le plus grand nombre de particules) et nous ne tiendrons pas compte de la parallaxe du Soleil qui est négligeable : ces simplifications ne modifient pas la nature du raisonnement et de ses conséquences, comme il est facile de s'en assurer.

Soient (*fig. 11*) S, le Soleil; A et A', les régions d'activité; n et n' , les normales aux centres de ces régions; ee , la direction où se trouve la Terre à l'équinoxe; ss , la direction où elle se trouve au solstice.

A l'équinoxe, la Terre reçoit de A un rayonnement proportionnel à . . .	$\cos 8^\circ$
Et de A' un rayonnement proportionnel à	$\cos 22^\circ$
Au solstice, la Terre reçoit de A un rayonnement proportionnel à	$\cos 15^\circ$
Et de A' un rayonnement proportionnel à	$\cos 15^\circ$

Les intensités s'additionnant d'ailleurs, on trouve que les sommes des rayonnements reçus de A et de A' par la Terre sont respectivement proportionnelles :

Lors de l'équinoxe à	$\cos 8^\circ + \cos 22^\circ = 1,9173$
Lors du solstice à	$2 \cos 15^\circ = 1,9318$

Ce qui montre, non seulement que la différence est très faible, mais qu'elle est précisément dans le sens opposé à celui qu'indique M. Arrhénius, ce qui, dans son hypothèse, devrait donc produire les maxima des Aurores aux solstices et les minima aux équinoxes, contrairement à ce qu'on observe.

Enfin, on peut objecter à l'explication que donne M. Arrhénius de la période annuelle des Aurores que, si cette explication était la vraie, l'amplitude de cette période devrait être sensiblement nulle pendant les années sans taches (c'est-à-dire que pendant ces années on devrait observer en moyenne à peu près le même nombre d'Aurores aux équinoxes et aux solstices); cette période devrait au contraire avoir une amplitude très accentuée les années de maximum des taches. Or, à notre connaissance, *il n'a rien été constaté de pareil.*

Pour toutes ces raisons, on peut conclure que la théorie de M. Arrhénius, tout en constituant un progrès incontestable sur les recherches antérieures dans cet ordre d'idées, ne peut guère, malgré la complication des hypothèses qu'elle accumule, et aussi peut-être à cause de cette complication, être considérée comme une solution définitive. C'est déjà la conclusion à laquelle nous étions arrivé à propos de l'application de cette théorie à la Couronne solaire et aux perturbations magnétiques.

II. La théorie tout à fait remarquable proposée récemment par M. Kr. Birke-land (1) se rapproche sous bien des rapports de la théorie ancienne de A. de la Rive, et que divers savants, notamment Lemström et Edlund, avaient depuis modifiée sur divers points, pour l'adapter aux exigences nouvelles. qui ressortaient d'une connaissance plus exacte des caractères de l'Aurore boréale. Sans vouloir insister longuement sur les théories de De la Rive, Lemström et Edlund, qui sont complètement abandonnées et insuffisantes aujourd'hui, rappelons qu'elles attribuaient l'Aurore boréale à une luminescence de l'atmosphère produite par des courants électriques circulant de l'atmosphère au sol,

(1) *Videnskabselskabets Skrifter*, t. I. *Mathematisk-naturvidenskabelig Klasse*, 1901, n° 1.

ou inversement se dirigeant verticalement de la Terre vers l'atmosphère. M. Birkeland a heureusement modifié ces idées [qui soulevaient des difficultés nombreuses (1)], d'une part, en attribuant les Aurores, non plus à de pareils courants, mais à des courants électriques entièrement localisés dans l'atmosphère supérieure et qui y circuleraient à peu près parallèlement au sol, et, d'autre part, en faisant intervenir le Soleil dans la production de ces courants, tandis que les auteurs précédents les attribuaient à des causes exclusivement terrestres.

Dans une série d'expériences très ingénieuses, et pour le détail desquelles nous renvoyons au Mémoire original, M. Birkeland a montré que l'on peut produire dans un tube à air raréfié, en le faisant traverser par un courant électrique suffisamment dense, *et dans un champ magnétique faible*, des rayons cathodiques qui sont émis par les particules gazeuses et s'orientent dans le sens des lignes de force, en produisant des apparences identiques aux formes ordinaires des Aurores boréales. M. Birkeland a montré de plus que ces rayons cathodiques diffusés par la matière gazeuse étaient dus au courant électrique lui-même, et non pas aux rayons cathodiques émanés de la cathode des tubes employés, car, en éliminant ceux-ci par un dispositif spécial (2), les apparences radiées analogues aux Aurores se produisaient également.

M. Birkeland en conclut « qu'une Aurore boréale se manifeste chaque fois qu'un courant électrique suffisamment dense se produit dans les couches supérieures de l'atmosphère, à peu près parallèlement à la surface de la Terre ».

Enfin, et pour expliquer la période diurne et la période undécennale des Aurores et leurs coïncidences fréquentes avec la formation de taches solaires, M. Birkeland pense que ces courants électriques sont produits par des rayons cathodiques émanés du Soleil (3), et il appuie cette hypothèse sur l'expérience suivante : un électro-aimant sphérique est placé dans un tube à gaz raréfié et exposé au faisceau à peu près parallèle qui émane de la cathode; or, en mettant

(1) Voir notamment, à ce sujet, PAULSEN, *Meteorologische Zeitschrift*, 1894, passim.

(2) *Loc. cit.*, p. 56.

(3) Dans une première étude sur la question (*Archives des Sciences phys. et nat.*, Genève, juin 1896), M. Birkeland avait suggéré que les Aurores boréales seraient le trajet lumineux, dans notre atmosphère, de rayons cathodiques émanés du Soleil. Il a abandonné sans doute cette idée quand ses propres expériences lui eurent montré que, pour que les rayons cathodiques se propagent en ligne droite dans la direction des lignes de force d'un champ magnétique (et l'on sait que les rayons de l'Aurore sont orientés comme l'aiguille d'inclinaison et d'une remarquable rectitude, notamment dans les draperies), *il faut qu'ils soient produits dans ce champ*; c'est-à-dire que les rayons cathodiques des Aurores boréales doivent être *produits dans l'atmosphère elle-même*. Des rayons cathodiques émanés du Soleil s'enrouleraient au contraire autour des lignes de force du champ terrestre et les rayons auroraux auraient une direction toute différente de celle qu'on observe. Diverses expériences de M. Broca, indépendamment de celles de Birkeland, ont également montré que, pour que des rayons cathodiques suivent les lignes de force d'un champ, il faut qu'ils soient engendrés dans ce champ, à moins que la direction de leur émission soit précisément celle du champ, ce qui n'est pas le cas pour le Soleil, car la direction des lignes de force magnétique dans les régions polaires de la Terre est très inclinée sur celle des rayons solaires.

l'électro-aimant en activité, on observe, outre le phénomène bien connu de la succion des rayons cathodiques par les deux pôles, plusieurs anneaux lumineux bien définis dans le gaz voisin de la surface de la sphère; de plus on observe que la surface de l'électro-aimant (enduite au préalable de cyanure double de platine et de baryum) devient parfois fortement phosphorescente juste au-dessous de l'anneau lumineux situé en dehors d'elle. Cette phosphorescence est due évidemment à des rayons cathodiques émanés de l'anneau lumineux, et M. Birkeland en déduit que ces anneaux sont eux-mêmes des courants électriques engendrés au voisinage de la sphère par les rayons cathodiques.

Les rayons cathodiques émanés du Soleil agiraient de même sur la Terre en produisant des courants électriques, dans l'atmosphère, d'où émaneraient des rayons cathodiques secondaires formant les Aurores boréales.

Telle est, dans ses grandes lignes, la théorie de M. Birkeland. On peut dire qu'elle explique d'une manière complète, à la fois, les formes des Aurores boréales, leur fréquence plus grande près des pôles terrestres, leur orientation caractéristique, leur influence sur la formation des nuages, leur période diurne et leur période undécennale, comme il ressort des développements de l'auteur. Cette théorie est incontestablement plus satisfaisante que toutes celles qui avaient été proposées auparavant par sa simplicité relative et le grand nombre des faits d'observation qu'elle explique. Peut-on la considérer cependant comme définitive et suffisante? M. Birkeland lui-même ne paraît pas le croire; au sujet de l'expérience que nous venons de décrire, il constate lui-même que l'interprétation qu'il en a donnée n'est pas absolument certaine, et qu'il n'a pas pu prouver d'une manière certaine que les anneaux lumineux, que, dans cette expérience, on observe autour de l'électro-aimant sphérique, soient réellement produits par les rayons cathodiques aspirés vers les pôles ⁽¹⁾. Rien ne prouve, en effet, que ces anneaux lumineux soient dus aux rayons cathodiques du tube plutôt qu'à la décharge électrique elle-même; l'électro-aimant dans cette expérience se trouve à l'intérieur du tube à gaz raréfié, et il se trouve à la fois sur le trajet de la décharge elle-même et sur celui des rayons cathodiques, c'est-à-dire dans des conditions très différentes de celles de la Terre qui, dans cette hypothèse, se trouve exposée uniquement aux rayons cathodiques venus du Soleil, et en dehors des décharges qui, sur le Soleil même, produisent ces rayons. D'ailleurs rien ne prouve que ces anneaux lumineux autour de l'électro-aimant soient, comme le suppose M. Birkeland, des courants électriques produits autour de celui-ci ⁽²⁾. L'interprétation de cette expérience sur laquelle M. Birkeland appuie son hypothèse peut donc sembler un peu arbitraire.

⁽¹⁾ *Loc. cit.*, p. 74.

⁽²⁾ Lénard, qui a étudié les rayons cathodiques en dehors du tube excitateur (voir *Wiedemann's Annalen*, t. II, p. 225 et passim), c'est-à-dire précisément dans les conditions où les rayons catho-

D'autre part, les rayons cathodiques produits à la surface du Soleil seraient particulièrement intenses au voisinage des centres d'activité, et c'est ainsi que M. Birkeland explique la période undécennale des Aurores boréales. D'autre part aussi, les auteurs qui ont émis cette hypothèse d'un rayonnement cathodique du Soleil (Goldstein, Deslandres, etc.) ont indiqué que ce rayonnement doit se propager à peu près normalement à la surface solaire au-dessus du lieu d'émission; comme on sait que les centres d'activité du Soleil ont sur cet astre une répartition à peu près invariable et constante ⁽¹⁾, qui a conduit un grand nombre de savants (et notamment M. Birkeland) à penser qu'ils sont dus à un système fixe de cratères fixés invariablement sur un noyau rigide dont la période de rotation est d'environ 26 jours, il s'ensuit que l'on doit s'attendre, si l'explication de M. Birkeland est exacte, à trouver une période nette d'environ 26 jours dans la fréquence des Aurores boréales. Effectivement, Veeder ⁽²⁾ a cru trouver, en étudiant un certain nombre d'Aurores observées aux États-Unis, une période de 27 jours 6 heures; au contraire Hazen ⁽³⁾, par une étude très approfondie de la question, n'a pas trouvé trace d'une période des Aurores boréales d'une durée voisine de la période de rotation des taches. Mais, comme l'a fait remarquer Backhouse ⁽⁴⁾, il est bien difficile d'élucider la question, car la période qu'a cru trouver Veeder a presque la même durée qu'une lunaison : lorsque la Lune brille, les Aurores peu intenses demeurent complètement invisibles, ce qui peut sans doute produire une période *apparente*, mais non réelle des Aurores, voisine de celle trouvée par Veeder. La question était d'autant plus difficile à résoudre que les Aurores ne sont pas visibles chaque nuit, loin de là; que leur visibilité dépend de conditions météorologiques variables, indépendantes de leur existence, et que, si de l'ensemble des observations on peut déduire quelque chose de certain lorsqu'il s'agit de déceler une périodicité d'une ou de plusieurs années, il n'en est plus de même pour une période de moins d'un mois. Mais nous pouvons envisager la question sous un autre aspect; dans la théorie de M. Birkeland, les perturbations magnétiques sont comme les Aurores produites par les courants atmosphériques dus, dans cette hypothèse, aux rayons cathodiques émanés du Soleil; *il devrait donc exister une périodicité des perturbations magnétiques de durée*

diques émanés du Soleil doivent agir sur la Terre, a trouvé que ces rayons n'illuminent ces gaz traversés que quand ceux-ci ont une pression relativement élevée; que, pour des pressions inférieures à 50^{mm}, ils n'y produisent plus de luminescence, et que celle qu'on observe pour des pressions plus faibles (de l'ordre de 1^{mm} et au-dessous) est d'une nature toute différente, et produite non plus par les rayons cathodiques, mais par l'induction due à la décharge du tube excitateur, car elle n'en subsiste pas moins lorsque, par un dispositif spécial, on a éliminé les rayons cathodiques du tube d'observation : ce qui tend à infirmer l'interprétation que donne M. Birkeland de son expérience.

(1) Voir BIRKELAND, *Rapports du Congrès de Physique*, 1900, p. 471-479.

(2) *Proceedings of the Rochester Academy of Science*, vol. II, 1893.

(3) *Amer. meteorol. Journal*, t. X (1893) et t. XI (1894).

(4) *Publications of West Hendon House Observatory Sunderland*.

égale à la rotation du noyau solaire, si cette théorie est exacte. Et sur ce point, l'enregistrement *continu* des variations des éléments magnétiques, enregistrement qui ne dépend aucunement, comme l'observation des Aurores, de conditions de visibilité variables, permet de se faire une opinion certaine.

Dans le but de résoudre cette question, M. Arthur Schuster a récemment calculé en détail et d'une manière complète les périodographes des variations de la déclinaison magnétique, en prenant comme base les observations ininterrompues faites à l'observatoire de Greenwich de 1871 à 1895, soit pendant 25 ans. Voici comment il énonce la conclusion de ce travail ⁽¹⁾ : « Comme conclusion de mes recherches, je peux définitivement énoncer que la déclinaison magnétique à Greenwich n'indique aucune période sensible comprise entre 25 et 27,5 jours. On peut donc considérer *définitivement* que la rotation solaire n'exerce aucune influence sur les variations magnétiques. » Il semble que ce fait si net, établi par une autorité comme M. Alfred Schuster, peut paraître de nature à ébranler la théorie de M. Birkeland, pour ce qui est du rôle qu'elle fait jouer au Soleil dans la production des Aurores boréales et des perturbations magnétiques.

Si, d'un autre côté, on examine, à la lumière des faits, la manière dont cette théorie envisage la production des Aurores par des courants électriques qui se produiraient dans l'atmosphère supérieure, on se heurte à une difficulté d'un autre ordre. Si, comme le dit M. Birkeland, « les Aurores boréales se manifestent chaque fois qu'un courant électrique suffisamment dense se produit dans les couches supérieures de l'atmosphère », *on devrait observer, chaque fois qu'une Aurore se produit, une perturbation de l'aiguille aimantée due à ce courant, perturbation d'autant plus grande que l'Aurore est plus brillante.* Or il a été établi par l'expérience (*Voir ci-dessus*) qu'il n'en est rien; que, dans les régions où l'on observe le plus d'Aurores boréales, celles-ci, et même les plus brillantes, se produisent sans la moindre perturbation magnétique, et que l'aiguille aimantée n'est influencée que rarement et faiblement par les Aurores, et seulement par celles qui quoique faibles *sont animées de mouvements rapides.* Il y a là une difficulté qui paraît insurmontable avec la théorie de M. Birkeland. Peut-on, dans ces conditions, considérer cette dernière comme pleinement satisfaisante?

C.

Il nous a paru que la considération du rayonnement hertzien émané du Soleil est de nature à apporter quelques éléments de solution au problème des

⁽¹⁾ *The Observatory*, 1902.

Aurores boréales et à résoudre simplement quelques-unes des difficultés contre lesquelles se butaient les théories antérieures.

Le fait que les grandes Aurores boréales des régions arctiques apparaissent fréquemment sans influencer l'aiguille aimantée et que seules les Aurores à mouvements rapides s'accompagnent parfois de perturbations des aimants semble démontrer que les courants électriques de l'atmosphère, agents de ces perturbations, ne sont pas la cause des Aurores boréales, mais sont des phénomènes concomitants qui n'accompagnent celles-ci que dans certains cas. Ces conclusions se dégagent des faits eux-mêmes, comme M. Paulsen l'avait déjà montré par une étude approfondie des phénomènes (¹). Mais alors se posent nettement les questions suivantes : Des rayons cathodiques peuvent-ils être produits dans les gaz raréfiés autrement que par un courant électrique? Quelle est la nature de l'agent physique qui peut produire ces rayons cathodiques et rendre les gaz raréfiés lumineux sans produire en même temps des courants électriques agissant sur l'aiguille aimantée? Comment des courants électriques peuvent-ils être néanmoins produits par cet agent physique quand les portions de l'atmosphère traversées par lui sont animées de mouvements rapides?

Les ondes hertziennes qui, comme nous l'avons établi, doivent émaner du Soleil, paraissent fournir une réponse à toutes ces questions :

1° On sait que les ondes hertziennes ont la propriété d'illuminer les gaz raréfiés, exactement comme un courant voltaïque; 2° On sait notamment par les recherches fondamentales d'Ebert et Wiedmann (²) que, dans la luminescence des gaz raréfiés sous l'influence des oscillations hertziennes, il se produit en abondance dans le sein de ces gaz des rayons cathodiques; 3° Nous avons dans le précédent Chapitre établi que, quand les portions atmosphériques traversées par les ondes hertziennes solaires *sont animées de mouvements* par rapport au champ magnétique de la Terre, il doit s'y manifester des courants électriques, et cette conception nous a permis d'expliquer les diverses variations périodiques et les perturbations du Magnétisme terrestre.

En un mot, nous pensons que LES AURORES BORÉALES SONT DES PHÉNOMÈNES LUMINEUX PRODUITS DANS L'ATMOSPHÈRE SUPÉRIEURE PAR LES ONDES HERTZIENNES ÉMANÉES DU SOLEIL, conformément aux propriétés connues de ces ondes.

Nous allons de nouveau passer rapidement en revue les principaux faits connus relatifs aux Aurores boréales, et montrer comment ils découlent naturellement de cette conception. Nous le ferons dans l'ordre adopté pour l'exposé des faits qui se trouve au début de ce Chapitre.

Formes des Aurores boréales. — Nous avons rappelé que dans les formes variées

(¹) PAULSEN, *Meteorologische Zeitschrift*, 1894, passim.

(²) *Wied. Ann.*, t. LIII, p. 156 et suiv.

de l'Aurore boréale, bandes, couronnes radiées, draperies et lueurs diverses, les rayons distincts que l'on observe sont le plus souvent développés dans le sens du zénith, de telle sorte que les apparences formées par l'ensemble des rayons diminuent d'intensité vers le haut et se fondent peu à peu dans le ciel, tandis que le bord inférieur du phénomène est à la fois beaucoup plus intense et *nettement délimité vers le bas*. L'explication de ces faits paraît fort simple : les rayons cathodiques engendrés dans les couches raréfiées de l'atmosphère par les ondes hertziennes solaires s'orientent, comme l'a montré l'expérience, dans le sens des lignes de force du champ magnétique, qui, dans les régions polaires, sont peu différentes de la verticale ; d'autre part, on sait ⁽¹⁾ que la phosphorescence produite dans un gaz par les rayons cathodiques est d'autant plus vive que, toutes choses égales d'ailleurs, sa densité est plus grande. Il s'ensuit que, les rayons cathodiques des Aurores se propageant à peu près verticalement, la luminescence des couches d'air traversées par eux est d'autant moins intense que ces couches sont plus raréfiées, c'est-à-dire plus élevées. D'autre part, l'expérience a montré ⁽²⁾ que dans un champ électrique la propagation des rayons cathodiques est favorisée quand elle a lieu dans le sens $- +$ et que dans le sens $+ -$ elle est au contraire empêchée et même annulée lorsque la valeur totale du champ parcouru est égale à la différence de potentiel de décharge de ces rayons. Or le champ électrique de la Terre est vertical et dirigé de l'atmosphère vers le sol, c'est-à-dire que dans les régions voisines des pôles la direction des rayons de l'Aurore est sensiblement celle de ce champ ; de plus, l'intensité de ce dernier est de l'ordre de 100 volts par mètre ⁽³⁾, ce qui, pour quelques kilomètres, donne une différence de potentiel de beaucoup supérieure à celles qui suffisent pour la production des rayons cathodiques les plus rapides ⁽⁴⁾. Les rayons cathodiques produits dans l'atmosphère supérieure ne peuvent donc se propager que vers le zénith, leur propagation vers le sol est rapidement annulée par le champ électrique de la Terre, dont les potentiels croissent avec la hauteur, comme on sait. Il s'ensuit que les apparences radiées des Aurores boréales doivent être nettement arrêtées vers le bas, et développées au contraire dans le sens du zénith. C'est en effet le phénomène qu'on constate et qui, à notre connaissance, n'avait pas été expliqué jusqu'ici.

De plus, les observateurs ont depuis longtemps constaté que fréquemment il se produit des diminutions soudaines ou même des changements brusques de signes accidentels et locaux, dans le champ électrostatique de la Terre. Les rayons des Aurores doivent subir dans leur propagation le contrecoup de ces variations acci-

(1) LÉNARD, *loc. cit.*

(2) VILLARD, *Les rayons cathodiques*, passim.

(3) EXNER, *Rapports du Congrès de Physique*, t. III.

(4) LANGEVIN, *Thèse*, passim.

dentelles du champ électrique; et ainsi s'expliquent les mouvements rapides des rayons auroraux dans le sens de leur longueur que l'on a observés parfois ⁽¹⁾. On dit alors que les rayons auroraux « dansent » ou « dardent ».

Extension des Aurores boréales. — Comme nous l'indiquerons au paragraphe suivant, dans les conditions ordinaires, l'illumination de l'air produite par les rayons cathodiques qu'engendrent dans l'atmosphère supérieure les ondes hertziennes rayonnées du Soleil ne peut être visible que dans les régions polaires; car là seulement les régions atmosphériques dans lesquelles les ondes solaires peuvent pénétrer sans être absorbées sont suffisamment basses, c'est-à-dire suffisamment denses pour que les rayons cathodiques produits y engendrent une luminosité notable, et assez intense pour être visible malgré la lumière diffuse du ciel.

Mais lorsque, par suite de perturbations violentes de la surface solaire, les décharges électriques qui s'y produisent et simultanément les ondes hertziennes qui en émanent, deviennent beaucoup plus intenses, celles-ci peuvent pénétrer sans être absorbées dans des couches atmosphériques plus basses et plus denses, de telle sorte que les rayons cathodiques produits y engendrent une luminosité suffisamment intense pour être visible.

Ainsi s'explique que certaines Aurores boréales, accompagnant des manifestations intenses d'activité solaire, cessent d'être observables uniquement près des pôles, et peuvent être visibles à des latitudes beaucoup plus méridionales et sur presque toute la Terre. ≠

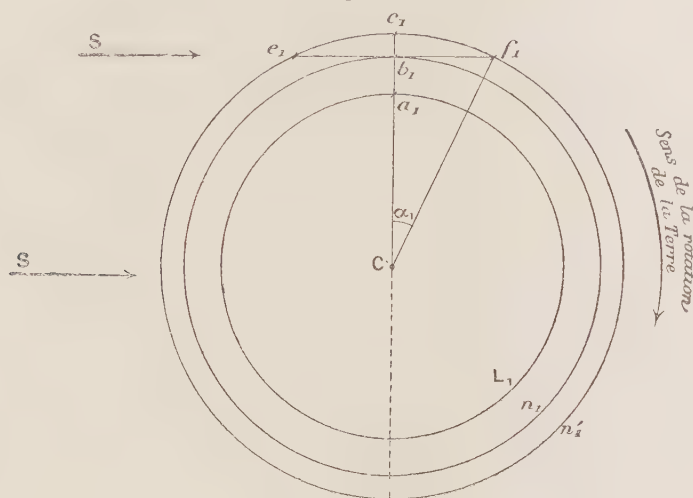
Fréquence des Aurores boréales. — A première vue il pourrait paraître étonnant que les Aurores boréales étant produites par le rayonnement solaire, leur éclat et leur fréquence soient précisément les plus grands dans les régions polaires, où l'insolation est relativement beaucoup moins intense que dans les régions plus voisines de l'équateur. Mais cette anomalie n'est qu'apparente; car, s'il est vrai qu'au milieu du jour l'insolation est de moins en moins intense à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur vers les pôles, un calcul simple va nous montrer que, inversement, la pénétration des rayons solaires dans l'atmosphère, à partir du coucher du Soleil, c'est-à-dire au moment où les Aurores boréales deviennent visibles, est de plus en plus grande à mesure qu'on se rapproche des pôles.

Dans ce raisonnement, nous considérerons, pour simplifier (et sans que cela altère en quoi que ce soit le résultat), que la propagation des ondes électriques dans notre atmosphère est *rectiligne*. (Plus loin, à propos de l'étude de la *Période diurne*, nous verrons comment il faut modifier cette manière de voir.) Soient L_1 et

(1) ANGOT, *loc. cit.*, p. 115. — BIRKELAND, *loc. cit.*, p. 66 et suiv.

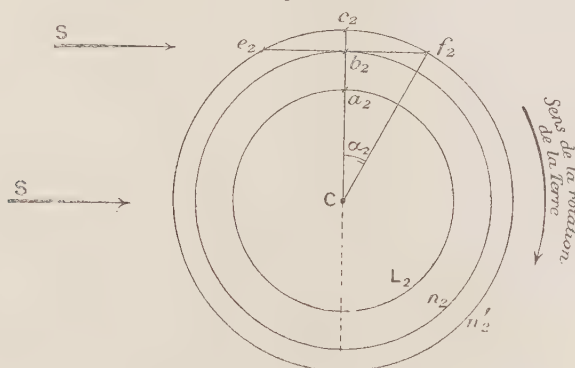
L_2 les sections de la Terre suivant deux parallèles, de latitudes λ_1 et λ_2 ($\lambda_2 > \lambda_1$); soient Ca_1 et Ca_2 les rayons de ces deux parallèles ($Ca_1 > Ca_2$); soit aussi S la direction des rayons solaires perpendiculaires à Ca_1 et Ca_2 , de telle sorte que la moitié de la surface de la Terre, à droite des diamètres Ca_1 et Ca_2 est plongée dans la nuit; supposons, pour simplifier, que les rayons cathodiques produits

Fig. 12.



par les ondes hertziennes solaires le soient exclusivement entre deux couches

Fig. 13.



de niveau donné de l'atmosphère, correspondant à deux pressions déterminées de l'air; soient respectivement n_1 et n'_1 , n_2 et n'_2 ces couches (il est facile de voir que ces simplifications n'altèrent en rien les résultats du raisonnement). On sait que la pression de l'atmosphère est sensiblement égale sur toute la Terre; il s'ensuit que les distances respectives de ces couches de niveau entre elles et à la Terre sont égales dans les deux figures 12 et 13 :

$$a_1 b_1 = a_2 b_2 \quad \text{et} \quad a_1 c_1 = a_2 c_2.$$

Si $e_1 f_1$ et $e_2 f_2$ sont les rayons solaires qui traversent la couche comprise entre n_1 et n'_1 et entre n_2 et n'_2 tangentielllement à n_1 et n_2 , on voit facilement par le calcul :

1° que

$$e_1 b_1 > e_2 b_2;$$

2° que

$$\alpha_1 < \alpha_2,$$

(α_1 et α_2 étant les angles $a_1 C f_1$ et $a_2 C f_2$), et que la différence entre $e_1 b_1$ et $e_2 b_2$ d'une part et entre α_2 et α_1 d'autre part est d'autant plus grande que le rayon Ca_2 est plus petit par rapport à Ca_1 , c'est-à-dire que le cercle de latitude L_2 est plus voisin des pôles : ce qui signifie (étant donné d'autre part que les Aurores boréales ainsi produites ne peuvent être visibles qu'en $b_1 f_1$ et $b_2 f_2$ puisque les portions de la surface terrestre au-dessous de $e_1 b_1$ et $e_2 b_2$ sont encore éclairées par le Soleil), *d'une part*, que les rayons hertziens du Soleil traversent, avant d'arriver dans les régions atmosphériques où ils produisent des Aurores boréales visibles, une épaisseur de gaz absorbant beaucoup moins grande à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur vers les pôles (¹) (puisque $e_1 b_1 > e_2 b_2$) et, *d'autre part*, qu'il peuvent produire des Aurores boréales pendant un temps beaucoup plus long après le coucher du Soleil, à mesure que la latitude augmente (puisque $\alpha_1 < \alpha_2$).

Nous pouvons illustrer ce résultat par un exemple numérique. Considérons, par exemple, le parallèle L_1 comme étant celui qui passe par le centre de la France (latitude $\lambda_1 = 47^\circ$) et le parallèle L_2 comme passant par le nord de la Scandinavie (latitude $\lambda_2 = 70^\circ$). On a alors sensiblement, R étant le rayon équatorial de la Terre :

$$Ca_1 = R \cos 47^\circ = R \times 0,68,$$

$$Ca_2 = R \cos 70^\circ = R \times 0,34;$$

d'autre part les figures de la page précédente donnent les relations :

$$\overline{e_1 b_1}^2 = (2 Ca_1 + 2 a_1 b_1 + b_1 c_1) b_1 c_1,$$

$$\overline{e_2 b_2}^2 = (2 Ca_2 + 2 a_2 b_2 + b_2 c_2) b_2 c_2;$$

ou, sensiblement, puisque l'épaisseur de l'atmosphère absorbante est petite par rapport du rayon terrestre :

$$\overline{e_1 b_1}^2 = 2 Ca_1 \times b_1 c_1,$$

$$\overline{e_2 b_2}^2 = 2 Ca_2 \times b_2 c_2;$$

(¹) C'est-à-dire que l'intensité des Aurores boréales, leur éclat, leur nombre, augmentent à mesure qu'on se rapproche des pôles.

et comme $b_1 c_1 = b_2 c_2$, on a finalement

$$\left(\frac{e_1 b_1}{e_2 b_2}\right)^2 = \frac{C a_1}{C a_2} = 2,$$

d'où

$$e_1 b_1 = e_2 b_2 \times \sqrt{2}.$$

Si l'on considère comme égale à l'unité l'amplitude des rayons hertziens solaires quand ils entrent dans notre atmosphère, et si x est un certain nombre qui dépend du pouvoir absorbant des diverses couches de l'atmosphère, il s'ensuit que l'amplitude des rayons hertziens solaires, quand ils pénètrent dans le côté soir de l'atmosphère, est :

en Norvège

$$e^{-x \times e_1 b_1} = A_2;$$

en France

$$e^{-x \times e_1 b_1 \times \sqrt{2}} = A_1$$

et

$$A_1 = A_2^{\sqrt{2}};$$

par suite, en désignant par I_1 et I_2 les intensités correspondantes (qui sont entre elles comme les carrés des amplitudes),

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 = A_2^{2\sqrt{2}-2};$$

c'est-à-dire que si à une hauteur donnée dans l'atmosphère les rayons hertziens du Soleil ont subi une absorption telle que, au moment où ils pénètrent dans le côté soir de l'atmosphère, au-dessus de la Norvège, leur amplitude est réduite par exemple à $\frac{1}{10}$ de sa valeur antérieure à l'absorption atmosphérique, il s'ensuit qu'en France, et à la même hauteur au-dessus du sol, l'intensité des ondes hertziennes au moment où elles pénètrent dans le côté soir de l'atmosphère sera inférieure à $\frac{1}{50}$ (égale exactement à 0,014) de ce qu'elle est en Norvège dans les mêmes conditions; si l'amplitude en un point de l'atmosphère en Norvège est, toutes choses égales d'ailleurs, réduite à $\frac{1}{100}$ par l'absorption des rayons avant qu'ils arrivent du côté soir, leur intensité à la même hauteur ne sera en France que $\frac{1}{5000}$ de ce qu'elle est en Norvège.

On conçoit dans ces conditions que l'intensité et la fréquence des phénomènes auroraux augmentent rapidement à mesure qu'on s'élève en latitude.

Il est une autre raison qui doit favoriser encore l'augmentation de la fréquence des Aurores à mesure qu'on se rapproche des pôles : c'est la diminution de température. L'expérience a en effet montré que la luminescence électrique des gaz

est d'autant plus vive, toutes choses égales d'ailleurs, que la température est plus basse.

Si aucune autre cause n'intervenait la fréquence des Aurores boréales devrait donc avoir son maximum aux pôles de la Terre. Mais, comme nous le montrerons ci-dessous à propos de la *période diurne*, l'intensité des phénomènes auroraux en un point de l'atmosphère supérieure dépend, non seulement de l'intensité des ondes hertziennes solaires qui y pénètrent pendant la soirée et la nuit, mais aussi de l'*ionisation* antérieure plus ou moins intense de cette portion atmosphérique; cette *ionisation* préalable, comme nous l'indiquerons, est d'autant plus intense, toutes choses égales d'ailleurs, que l'insolation pendant le jour a été plus vive; et l'on sait que celle-ci est maximum à l'équateur et décroît rapidement à mesure qu'on se rapproche des pôles, c'est-à-dire à mesure que les rayons solaires pénètrent plus obliquement dans l'atmosphère.

La fréquence maximum des Aurores doit donc se produire non pas aux pôles, mais à une certaine distance de celui-ci, et *il doit exister autour des pôles une zone de fréquence maximum des Aurores boréales. C'est ce qui a été depuis longtemps constaté.* (Voir ci-dessus, c.)

D'autre part, la direction et l'intensité du champ magnétique terrestre interviennent également dans la production des phénomènes auroraux. MM. Ébert et Wiedmann ont, en effet, montré expérimentalement que quand des oscillations électriques traversent un gaz raréfié, l'illumination produite dans ce gaz est rendue *beaucoup plus vive* quand un champ magnétique est disposé dans ce gaz de telle manière que ses lignes de force soient perpendiculaires à la direction de la force électrique des oscillations, ce qui n'a pas lieu, au contraire, quand cette dernière direction coïncide avec celle des lignes de force ⁽¹⁾. Or nous verrons ci-dessous, à propos de la *Période diurne des Aurores*, que la force électrique des oscillations hertziennes émanées du Soleil doit être sensiblement normale en chaque point à la surface des couches atmosphériques conductrices le long desquelles elles se propagent; comme d'autre part les lignes de force du champ magnétique terrestre sont sensiblement, à l'équateur, parallèles à la surface de la Terre, c'est-à-dire à la surface de ces couches, et qu'à mesure qu'on se rapproche du pôle elles s'inclinent de plus en plus jusqu'à devenir verticales, il s'ensuit que, *toutes choses égales d'ailleurs*, la production des phénomènes auroraux deviendrait de moins en moins intense à mesure qu'on se rapproche du pôle magnétique.

Si le pôle magnétique de la Terre se confondait avec le pôle de rotation, la zone de fréquence maximum des Aurores boréales serait à une certaine distance du pôle commun et centrée sur celui-ci. Mais le pôle de rotation et le pôle magnétique sont, en réalité, assez éloignés l'un de l'autre; comme d'autre part,

(1) ÉBERT et WIEDMANN, *Wied. Ann.*, t. LXII, p. 182.

ainsi que nous venons de le voir, des deux causes qui tendent à limiter l'accroissement de la fréquence des Aurores boréales à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, l'une a son maximum d'effet au pôle de rotation, et l'autre au pôle magnétique de la Terre, *il s'ensuit que la zone de fréquence maximum des Aurores boréales doit être grossièrement centrée sur un point situé entre le pôle magnétique et le pôle de rotation de la Terre.*

C'est effectivement ce que l'observation a révélé depuis longtemps ⁽¹⁾.

Hauteur des Aurores boréales. — L'expérience a montré ⁽²⁾ que les gaz ne deviennent lumineux sous l'influence des ondes hertziennes, avec production de rayons cathodiques, que quand ces ondes ont une certaine énergie minima. Or, il suffit de se reporter à la figure et aux calculs du Paragraphe précédent pour s'assurer que les rayons hertziens du Soleil peuvent, près des pôles, pénétrer dans les régions atmosphériques où se produisent des Aurores boréales visibles, jusqu'à une distance du sol beaucoup moins grande que la hauteur minima à laquelle pénètrent, dans des pays plus voisins de l'équateur, des ondes *ayant subi une absorption égale*, toutes choses égales d'ailleurs, de la part des couches atmosphériques traversées. (Cela résulte immédiatement de l'inégalité $e_1 b_1 > e_2 b_2$.)

L'expérience a montré (*voir ci-dessus, d*) que dans les régions arctiques la partie inférieure des Aurores n'est fréquemment qu'à une vingtaine de kilomètres au-dessus du sol, tandis que dans les régions plus méridionales (Suède, par exemple) elle ne descend guère au-dessous de 80^{km}. Or, un calcul simple analogue à celui que nous avons fait ci-dessus montre que tel est précisément l'ordre de grandeur des différences que permet de prévoir notre théorie entre les hauteurs des phénomènes auroraux en Suède et dans les régions où séjournent habituellement les expéditions polaires.

Deux circonstances doivent, en outre, favoriser l'abaissement de la hauteur des Aurores à mesure qu'on s'élève en latitude : *d'une part*, l'expérience a montré ⁽³⁾ que la luminescence électrique des gaz est d'autant plus intense que la température est plus basse, c'est-à-dire que, même si l'intensité des ondes hertziennes solaires quand elles pénètrent dans le côté soir de l'atmosphère était la même, à une même hauteur en tous les points du globe (ce qui n'est pas, comme nous venons de le voir), la production des Aurores pourrait avoir lieu à une hauteur de moins en moins grande au-dessus du sol à mesure qu'on rencontrerait, en s'avancant de l'équateur vers les pôles, des régions où la température est de moins en moins élevée; *d'autre part*, nous avons admis, pour sim-

⁽¹⁾ ANGOT, *loc. cit.*, p. 106 et suivantes. — LEMSTRÖM, *loc. cit.*, passim.

⁽²⁾ Wied. Ann., t. I., p. 14.

⁽³⁾ J. STARK, Wied. Ann., [4], t. I, p. 424.

plifier les calculs précédents, que la hauteur des diverses couches de niveau de l'atmosphère au-dessus du sol est la même à toutes les latitudes; or, l'étude du baromètre et la formule de Laplace montrent qu'il n'en est rien et que les couches de niveau se rapprochent du sol à mesure qu'on s'élève en latitude. Ainsi la formule de Laplace montre que la couche de niveau de l'atmosphère correspondant à une pression de 5^{mm} est (en fixant la température de l'équateur à $+25^{\circ}$ et du pôle à -12°) à 38^{km} du sol à l'équateur et à 34^{km} seulement au pôle; cette différence augmente rapidement, comme le montre le calcul, à mesure que l'on considère des couches de plus en plus élevées; et cette circonstance tend à fortifier les résultats auxquels nous sommes arrivé relativement à la diminution de hauteur des Aurores boréales avec la latitude.

À notre connaissance, on n'avait pas encore présenté d'explication rationnelle de ces faits.

Au point de vue quantitatif, notre conception ne les explique, semble-t-il, pas moins aisément. Nous avons rappelé, à propos du spectre de l'Aurore (voir *f*), que M. Ramsay a calculé que la pression, dans le tube de Geissler, où il produisait électriquement la raie verte du crypton qui est celle de l'Aurore boréale, pouvait descendre, sans que la raie cesse de se produire, jusqu'à une valeur qui correspond à une hauteur atmosphérique comprise entre 100^{km} et 200^{km} au-dessus du sol. Tel est bien l'ordre de grandeur des altitudes qu'on a trouvées pour les Aurores élevées des latitudes moyennes. D'autre part, les mesures les plus concordantes faites dans les régions arctiques conduisent, pour le bord inférieur des Aurores, à des hauteurs d'environ 30^{km} . La pression de l'air à cette altitude est, comme le montre la formule de Laplace (¹), d'environ 5^{mm} . Or, MM. Ébert et Wiedmann ont trouvé que dans les récipients à gaz raréfiés sur lesquels ils faisaient agir les oscillations hertziennes, il y avait déjà une production notable de rayons cathodiques pour une pression d'environ 2^{mm} et que les limites de pression entre lesquelles a lieu cette production de rayons cathodiques croissent extrêmement vite à mesure qu'augmente le volume du récipient (²).

On peut donc conclure que les limites entre lesquelles oscillent les hauteurs des Aurores boréales, telles qu'elles ressortent des mesures les plus concordantes, sont du même ordre que celles qui correspondent à la production de la luminescence cathodique dans les gaz raréfiés sous l'influence des ondes hertziennes. *Ce qui est bien conforme à notre conception.*

Orientation des rayons auroraux. — Les expériences de M. Birkeland ont montré que les rayons cathodiques produits au sein d'un gaz dans un champ

(¹) ANGOT, *loc. cit.*, p. 229.

(²) *Wied. Ann.*, *loc. cit.*, passim.

magnétique s'orientent suivant les lignes de force de ce champ ; et ainsi s'explique, comme nous l'avons déjà indiqué, l'orientation des rayons de l'Aurore boréale ; soit qu'ils demeurent isolés les uns des autres, soit que, serrés, leur ensemble se manifeste par ces formes variées des bandes, des draperies, des couronnes, ils conservent la direction de l'aiguille d'inclinaison, de telle sorte que, par l'effet de la perspective, ils doivent paraître converger vers le point du ciel où la direction de l'aiguille aimantée rencontre la voûte céleste. C'est effectivement ce qu'on observe. Cependant, divers observateurs, et notamment Bravais, Argelander, etc., ont fréquemment constaté que la direction des rayons auroraux est notablement différente, et dans des azimuts variables, de la direction de l'aiguille d'inclinaison. Mais cela s'explique aisément : il ressort, en effet, des expériences de J.-J. Thomson ⁽¹⁾ et Lénard ⁽²⁾ notamment, que dans un champ électrostatique les rayons cathodiques sont déviés de leur direction initiale dans le sens des potentiels croissants et déjà pour une valeur assez faible du champ ; et dans ces conditions on conçoit que toutes les variations locales de la direction du champ électrostatique terrestre dans les régions polaires, variations qui se produisent souvent dans l'atmosphère, comme on l'a constaté depuis longtemps, doivent affecter les rayons auroraux et leur donner parfois une direction assez différente de celle de l'aiguille d'inclinaison.

Spectre de l'Aurore. — Il est constitué, comme il résulte des travaux de Ramsay, Paulsen et Scheiner (voir *f*), outre la raie verte du crypton, par le spectre de la lumière entourant la cathode d'un tube à air raréfié. Or, précisément, l'expérience a montré que les ondes hertziennes illuminant les gaz à basse pression *y produisent exclusivement la lumière qui, dans les tubes de Geissler, entoure la cathode* (Glimmlicht) ⁽³⁾. Donc les caractères spectraux si particuliers de la lumière des Aurores boréales sont exactement ceux que permettait de prévoir notre conception.

Périodicité des Aurores boréales. — Nous avons exposé, au début de ce Chapitre, les principaux faits révélés par l'observation relativement aux diverses variations périodiques des Aurores boréales. Il semble que la plupart de ces faits découlent d'eux-mêmes, comme des conséquences logiques, de la manière dont nous envisageons la cause des Aurores boréales :

1° *Période diurne.* — A. Si les rayons hertziens émanés du Soleil avaient une propagation rigoureusement rectiligne, on ne conçoit évidemment pas comment

⁽¹⁾ *Philos. Mag.*, t. XLIV, p. 296.

⁽²⁾ *Wied. Ann.*, t. LXIV, p. 279.

⁽³⁾ *Wied. Ann.*, t. LIII, p. 253.

ils pourraient pénétrer dans l'atmosphère au-dessus des régions du globe pour lesquelles le Soleil est couché depuis longtemps, et les Aurores boréales ne pourraient pas être produites en un lieu donné, par ces rayons, pendant un temps très appréciable après la fin du crépuscule.

Mais en réalité la théorie montre que l'influence de la diffraction, qui ne modifie que faiblement la propagation de la lumière lorsqu'elle rencontre un obstacle, est d'autant plus marquée que la longueur d'onde est plus grande; donc les ondes hertziennes, qui sont plus de un million de fois plus longues que les ondes lumineuses, pénétreront beaucoup plus facilement dans l'ombre géométrique, et contourneront ainsi des obstacles qui nous paraissent énormes, tels que la convexité du globe terrestre qui, pour des distances de plusieurs milliers de kilomètres, représente un obstacle de plusieurs centaines de kilomètres de hauteur.

EN FAIT, on envoie aujourd'hui couramment, grâce aux travaux de M. Marconi, sur la télégraphie sans fil, des dépêches par le moyen des ondes hertziennes entre Terre-Neuve et la Cornouaille (Angleterre), qui sont à trois heures de différence de longitude, soit $\frac{1}{8}$ du tour complet de la Terre, et il ne paraît pas douteux que l'on parvienne dans un avenir plus ou moins prochain, et par l'emploi de générateurs d'ondes plus énergiques, à transmettre des signaux hertziens sensibles à des distances bien plus considérables encore.

EN THÉORIE, le problème a été traité récemment par M. Macdonald (¹), à l'aide des équations fondamentales de la théorie électromagnétique de la lumière. Il a étudié, comme cas particulier, celui (qui est précisément celui de la télégraphie sans fil) d'un oscillateur placé en dehors d'une sphère conductrice, et envoyant sur celle-ci des ondes électriques. Les résultats de M. Macdonald tendent à démontrer que les ondes peuvent contourner complètement la surface de cette sphère.

Mais, sans même qu'il soit nécessaire que nous nous appuyions sur ces résultats théoriques, nous pouvons tirer des résultats *expérimentaux* obtenus jusqu'ici en télégraphie sans fil, des conséquences décisives relativement à la question qui nous occupe.

Dans les expériences de Marconi, on a envoyé des ondes hertziennes sensibles entre Terre-Neuve et la Cornouaille, entre des stations dont la différence de longitude est environ 45° , et qui sur un grand cercle terrestre passant par elles sont à une distance angulaire d'environ 30° . — D'autre part, l'expérience a montré que, dans la télégraphie sans fil, les ondes hertziennes paraissent contourner la convexité du globe plus facilement, lorsqu'elles se propagent le long

(¹) *The bending of electric waves round a conducting obstacle* (*Proceedings of the R. S.*, 1903, n° 472, p. 251).

d'une surface relativement conductrice (la mer), que le long du sol, dont la conductibilité est pratiquement négligeable par rapport à celle de l'eau de mer.

Mais on sait que les gaz raréfiés se comportent vis-à-vis des ondes hertziennes comme des conducteurs; les expériences de M. J.-J. Thomson ont établi, en particulier, que la conductibilité de l'air raréfié passe par un maximum pour une pression de 1^{mm} environ, et qu'elle est alors du même ordre que celle des électrolytes très étendus. Or la formule de Laplace montre que la pression de l'air est d'environ 1^{mm} à une hauteur d'environ 50^{km}, et qu'elle n'est déjà plus que 0^{mm}, 1 à 15^{km} au-dessus, ce qui correspond à une conductibilité énormément plus faible; on peut donc envisager la terre comme entourée d'une couche sphérique conductrice située à environ 50^{km} au-dessus du sol, et le long de laquelle les ondes hertziennes solaires doivent se propager, comme les ondes hertziennes de la télégraphie sans fil, à la surface des mers.

C'est-à-dire que, en considérant par exemple le Soleil à l'équinoxe, ce qui est sa position moyenne, et en admettant, pour fixer les idées, que les ondes hertziennes solaires n'aient plus, lorsqu'elles arrivent au voisinage de la terre, qu'une intensité égale à celle des ondes produites artificiellement dans les récentes expériences de Marconi (et ceci est certainement bien au-dessous de la vérité, étant donnée la violence extraordinaire des mouvements éruptifs de la photosphère, où se produisent les décharges électriques engendrant ces ondes), il s'ensuit que ces ondes solaires à minuit (et *a fortiori*, plus tôt ou plus tard dans la nuit) ont dans les hautes couches de l'atmosphère, et toutes choses égales d'ailleurs, une intensité qui serait sensible à nos appareils, et cela dans toutes les régions situées à moins de 30° du pôle, c'est-à-dire dans celles précisément où l'on observe ordinairement les Aurores boréales.

En résumé : *les ondes hertziennes émanées du Soleil pénètrent dans l'ombre géométrique de la Terre, en suivant la courbure de la couche conductrice de l'atmosphère; elles pénètrent dans toute la portion de l'atmosphère plongée dans la nuit, au-dessus des régions où l'on observe des Aurores boréales.*

Il est d'ailleurs évident que l'intensité des ondes hertziennes solaires, qui parviennent la nuit en un point de l'atmosphère, est d'autant plus grande que le Soleil est moins bas au-dessous de l'horizon, c'est-à-dire que sa distance zénithale Z est plus petite en ce lieu.

Or la distance zénithale d'un astre d'angle horaire H et de distance polaire $\mathcal{P}$, en un lieu de colatitude λ , est donnée par la formule fondamentale de l'astronomie sphérique.

$$\cos Z = \cos \mathcal{P} \cos \lambda + \sin \mathcal{P} \sin \lambda \cos H.$$

Si l'on donne à $\mathcal{P}$ la valeur moyenne de la distance polaire du Soleil $\mathcal{P} = 90^\circ$, cette formule se réduit à

$$\cos Z = \sin \lambda \cos H.$$

On peut tirer de cette formule une conséquence remarquable : Pour une valeur donnée de H , c'est-à-dire à une heure donnée, $\cos Z$ varie comme $\sin \lambda$, c'est-à-dire comme le cosinus de la latitude ; comme d'ailleurs $\cos H$ est négatif pendant la nuit, il s'ensuit que l'intensité des ondes hertziennes solaires, qui parviennent dans l'atmosphère supérieure, augmente à mesure qu'on s'élève en latitude : c'est-à-dire qu'à une heure quelconque de la nuit, et toutes choses égales d'ailleurs, *la fréquence des Aurores boréales doit augmenter à mesure qu'on se rapproche des pôles*. Nous retrouvons ainsi le résultat auquel nous avons déjà été amené par des considérations entièrement différentes.

De ce qui précède il résulte que la période diurne apparente des Aurores boréales devrait être caractérisée par un minimum au milieu de la nuit, et par deux maxima, l'un au commencement, l'autre à la fin de la nuit, si la production des Aurores boréales en un point de l'atmosphère, à un moment donné, était proportionnelle *uniquement* à l'intensité des ondes hertziennes solaires qui à ce moment y pénètrent.

Or nous allons montrer qu'il n'en est rien, et que la production des Aurores boréales dépend concurremment d'un autre facteur non moins important.

B. Depuis longtemps l'expérience a montré que le passage de l'électricité dans un gaz raréfié et les phénomènes lumineux connexes dépendent d'une certaine *excitabilité* du gaz, extrêmement variable dans des conditions données de température et de pression. Tandis qu'en général le passage de l'électricité, dans un tube à gaz raréfié, ne commence à se produire qu'avec des différences de potentiel de plusieurs centaines de volts au moins, Hittorff a reconnu en 1879 ⁽¹⁾, qu'un gaz raréfié, parcouru par un courant électrique auxiliaire, devient apte à en conduire en même temps un autre, dont la force électromotrice peut être aussi faible qu'on veut, 1 volt par exemple. Ce résultat a été expérimentalement confirmé et étendu par Hertz ⁽²⁾, Schuster ⁽³⁾, Arrhénius ⁽⁴⁾ et, en ce qui concerne les ondes hertziennes, par MM. Wiedmann et Ebert ; nous parlerons tout à l'heure de ces dernières expériences.

Les recherches théoriques et expérimentales entreprises depuis quelques années en Angleterre par J.-J. Thomson et ses élèves, en France par M. Langevin, sur l'*Ionisation*, ont permis d'expliquer et de préciser les causes de ce phénomène. Ces recherches ont établi ⁽⁵⁾ : 1° que si un tube à gaz raréfié s'illumine plus difficilement pour une première décharge que pour celles qui la suivent, cela

(1) *Wied. Ann.*, t. VII, p. 553 et 614.

(2) *Wied. Ann.*, t. XIX, 1883, p. 782 et 813.

(3) *Proceed. R. S.*, t. XLII, 1887, p. 371.

(4) *Wied. Ann.*, t. XXXII, 1887, p. 545.

(5) Pour plus de détails sur ces recherches, nous renvoyons à l'étude remarquable qui en est faite dans la thèse de M. LANGEVIN, *Recherches sur les gaz ionisés*.

tient à ce que les *ions* produits au sein du gaz par la première décharge y subsistent un certain temps et favorisent les décharges ultérieures; 2° que l'illumination d'un gaz raréfié par une excitation électrique d'une énergie donnée est d'autant plus intense, toutes choses égales d'ailleurs, que le nombre des ions qui préexistaient dans le gaz est plus grand; 3° que, étant donnés des ions produits dans un tube à gaz raréfié, par une source d'ionisation qui a cessé d'agir, le nombre de ces ions diminue progressivement avec le temps: d'une part, par suite de l'effet de la *recombinaison* partielle des ions de signes contraires; d'autre part, par l'effet de la *diffusion* des ions, ceux-ci se portant sur les électrodes conductrices et les parois du tube auxquelles ils viennent céder leur charge.

On voit immédiatement que ces résultats expliquent le mécanisme du phénomène observé par Hittorf; ils permettent de même de saisir la cause des faits observés par MM. Wiedmann et Ebert, notamment dans l'expérience suivante: Un tube à gaz raréfié a ses électrodes réunies aux pôles d'une machine électrique et il est soumis en même temps à des oscillations hertziennes; l'intensité de celles-ci est assez faible pour que le tube ne soit pas illuminé, s'il n'a pas été traversé depuis longtemps par le courant de la machine; si, à l'aide de celle-ci, on fait passer une décharge dans le tube, les mêmes ondes hertziennes qui, auparavant, ne produisaient pas la moindre luminescence dans le tube, l'illuminent alors brillamment et encore pendant longtemps après que la décharge auxiliaire a cessé (1).

L'*excitabilité* produite dans le tube est due aux ions engendrés par la décharge et diminue en même temps que le nombre de ces ions par suite de leur *recombinaison* et leur *diffusion* vers les électrodes et les parois. Le calcul et l'expérience ont d'ailleurs montré (2) que dans le cas de tubes de dimensions moyennes comme celui employé par Ebert et Wiedmann, dans lesquels la pression n'est qu'une petite fraction de la pression atmosphérique, la diminution par recombinaison est petite par rapport à la perte par diffusion. La diffusion donne en effet aux ions une vitesse qui, à la pression atmosphérique, est de l'ordre de 1 cm par seconde (3); le coefficient de diffusion étant inversement proportionnel à la pression (4), et celle-ci dans le tube de Ebert et Wiedmann étant de l'ordre de $\frac{1}{1000}$ d'atmosphère, la vitesse due à la diffusion est ici de l'ordre de 10 m par seconde et l'on conçoit dans ces conditions que, dans un tube de quelques centimètres, la plupart des ions se soient portés sur les électrodes et les parois au bout d'un temps très court en leur cédant leur charge.

Mais il n'en est plus de même dans le cas d'un gaz occupant un espace très

(1) *Wied. Ann.*, t. LXIV, p. 258.

(2) *LANGEVIN, loc. cit.*, passim.

(3) *Ibid.*, p. 53.

(4) *Ibid.*, p. 170.

grand, ce qui est le cas de l'atmosphère supérieure; la diminution du nombre des ions due à la *diffusion* est alors sensiblement nulle, et ce nombre ne diminue que par suite de la *recombinaison*. Or, l'expérience a montré que les rayons violets et ultra-violets sont des agents d'ionisation très intenses; l'atmosphère supérieure doit donc être ionisée intensément par le rayonnement solaire pendant le jour; l'expérience a montré également que le nombre des ions produits par les ionisations les plus intenses ne dépasse guère 10^6 par centimètre cube.

L'expérience et la théorie des ions ont établi que le nombre des ions présents par unité de volume de gaz, n , est lié au temps t et à un *coefficient de recombinaison* α par la formule

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2,$$

d'où en intégrant

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \alpha t,$$

n_0 étant le nombre des ions à l'origine du temps t . Supposons qu'au moment du coucher du Soleil le nombre des ions en un point de l'atmosphère est égal à sa valeur maxima $n_0 = 10^6$. Les mesures ont indiqué que

$$\alpha = 3400 \times 7.10^{-10} \times p$$

en unités C. G. S. électrostatiques, p étant la pression exprimée en atmosphère, c'est-à-dire qu'à une hauteur d'environ 50^{km} qui correspond à la hauteur moyenne des aurores boréales, et où la pression est d'environ $\frac{1}{1000}$ d'atmosphère, on a

$$\alpha = 3,4 \times 7.10^{-10}$$

et comme l'ionisation par les rayons solaires ne se produit plus d'une manière appréciable après le coucher du Soleil, on a, un temps t après ce coucher, $\frac{1}{n_0}$ étant négligeable comme il est facile de le voir, sensiblement

$$n = \frac{1}{\alpha t} = \frac{10^9}{2,4 \times t}.$$

Si $t = 1$ heure $= 3600$

$$n = \frac{10^6}{8}.$$

Donc au bout de 1 heure le nombre des ions est encore égal à $\frac{1}{8}$ de sa valeur *maxima*; au bout de 2 heures à une quantité deux fois plus petite; et ainsi de suite à mesure qu'on s'avance dans la nuit et jusqu'au matin. En supposant la nuit égale à douze heures, le nombre des ions présents en un point de l'atmosphère est donc plus de 10 fois plus grand 1 heure après le coucher du Soleil;

que 1 heure avant son lever. Or, l'expérience a montré que l'excitabilité des gaz raréfiés par les ondes hertziennes est d'autant plus grande qu'ils sont plus facilement ionisés. *La période diurne de la fréquence des Aurores boréales doit donc être caractérisée par un maximum dans les premières heures de la soirée et ensuite par une diminution de l'intensité et du nombre des Aurores à mesure qu'on s'avance dans la nuit et jusqu'au matin.*

C'est, en effet, ce que l'observation a établi.

L'observation a également montré que la diminution de la fréquence des Aurores est surtout rapide pendant la première partie de la nuit; pendant la seconde partie elle est moins rapide et beaucoup moins nette. Ceci encore, notre théorie permettait de le prévoir : nous avons établi, en effet, ci-dessus (voir A) que l'amplitude des ondes hertziennes solaires qui parviennent en un point donné de l'atmosphère est plus grande au commencement et à la fin de la nuit qu'à minuit (cette différence étant d'ailleurs d'autant plus faible qu'on est plus près du pôle); *cette circonstance doit donc accentuer la diminution rapide du nombre des Aurores boréales entre le coucher du Soleil et minuit, et au contraire elle tend à annuler cette diminution de la fréquence dans la seconde partie de la nuit.* C'est précisément ce qui a été observé (voir notamment les courbes publiées dans Fritz, *Das Polarlicht*).

La période apparente de la fréquence diurne des Aurores dépend de la *visibilité* des phénomènes; le jour les Aurores sont invisibles par suite de la clarté du ciel, et l'on ne peut guère les percevoir avant la fin du crépuscule. D'après notre conception *le maximum RÉEL (et non observable) de leur période diurne doit tomber un peu après le milieu du jour.* Or, le seul essai de correction d'après la clarté du ciel qui ait été fait par Carlheim-Gyllenskiöld, d'après les observations exécutées par lui au Spitzberg (au cap Thordsen) et qui, non corrigées, donnaient un maximum vers 8^h du soir, l'ont conduit, en effet, en introduisant une correction de clarté, à un maximum réel vers 2^h du soir.

Comme la durée du crépuscule augmente à mesure qu'on s'élève en latitude, il s'ensuit qu'à *mesure qu'on s'approche du pôle le maximum apparent de la période diurne doit avoir lieu plus tard dans la soirée.* C'est précisément ce qu'on a constaté⁽¹⁾ : dans l'Europe moyenne (50° lat. N), le maximum diurne s'observe vers 9^h du soir; plus au nord, comme à Christiana et Upsal (60° lat. N) entre 9^h30 et 10^h et à Bossekop (70° lat. N) vers 10^h30. De même en Amérique on a observé que le maximum se présente environ 2 heures plus tard dans les contrées polaires que dans les latitudes moyennes (40° à 50° N).

Période annuelle. — Nous avons vu ci-dessus que le seul essai d'explication

(1) FRITZ, *Das Polarlicht*; Leipzig, p. 102.

de cette période qui, à notre connaissance, ait été proposé, celui d'Arrhénius, ne peut pas être considéré comme satisfaisant. Rappelons que cette variation annuelle de la fréquence des Aurores consiste dans les latitudes moyennes en une double périodicité, de telle sorte que les maxima ont lieu aux équinoxes et les minima aux solstices.

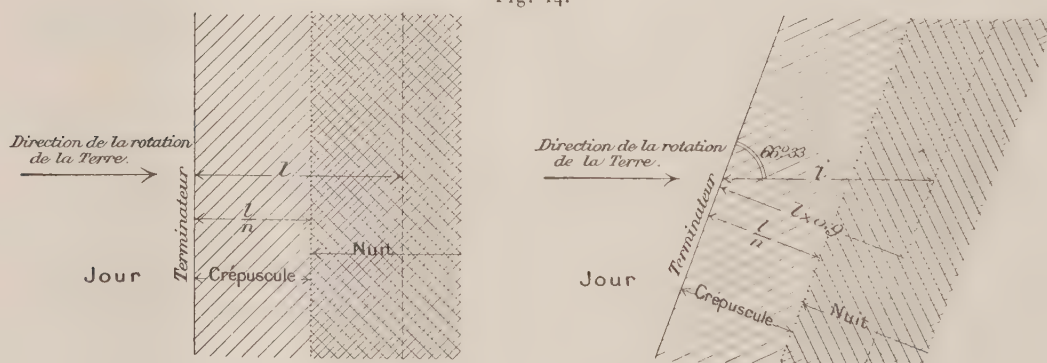
Les raisonnements suivants nous paraissent de nature à résoudre cette question. Ils sont indépendants de toute hypothèse sur la production et la nature des Aurores boréales; ils s'appuient uniquement sur ce fait, établi expérimentalement par l'observation de la variation diurne : que les Aurores se produisent avec d'autant plus d'intensité que l'atmosphère a été soustraite depuis moins longtemps à l'action des rayons solaires (nous venons de voir, d'ailleurs, comment ce caractère de la période diurne découle immédiatement de notre conception).

Au moment des équinoxes, le grand cercle terrestre qui sépare le jour de la nuit est perpendiculaire à l'équateur, c'est-à-dire à la direction du mouvement de rotation de la Terre; au moment des solstices, ce cercle terminateur est incliné sur l'équateur de $90^\circ - 23^\circ 27' = 66^\circ 33'$. Donc la portion de l'atmosphère insolée qui, par suite de la rotation de la Terre, passe dans un temps donné t , du jour dans la nuit, c'est-à-dire d'un côté à l'autre du terminateur, occupe le long de celui-ci une surface dont la largeur, au moment des équinoxes, est l , et au moment des solstices

$$l \times \sin 66^\circ 33' = l \times 0,9$$

(l étant l'arc dont tourne la terre dans le temps t). Toutes choses égales d'ail-

Fig. 14.



leurs, on doit donc observer 10 Aurores aux équinoxes pendant qu'on en observe 9 aux solstices.

D'autre part l'effet du crépuscule est, comme on le voit facilement, d'augmenter encore cette différence. En effet, pendant le crépuscule, qui règne dans

une portion de l'atmosphère occupant le long du terminateur une largeur que nous désignerons par $\frac{l}{n}$, les Aurores ne sont pas visibles, par suite de l'éclairement encore trop grand de l'atmosphère, et d'autre part l'action du Soleil sur la production des Aurores ne se manifeste plus qu'avec une intensité que nous pouvons, pour simplifier, considérer comme négligeable. Donc, si l est la largeur, comptée à partir du terminateur, de la portion d'atmosphère dans laquelle le plus grand nombre des Aurores se produit après le coucher du Soleil (le nombre des Aurores produites dans les portions plongées davantage dans la nuit étant négligeable par rapport à celui-ci), on voit que, par suite de l'effet du crépuscule, le rapport des nombres des Aurores au solstice et à l'équinoxe est environ

$$r = \frac{l \times 0,9 - \frac{l}{n}}{l - \frac{l}{n}}.$$

Ce rapport est plus petit que $\frac{l \times 0,9}{l}$. Si, pour fixer ces idées, on fait, par exemple, $n = 2$, on trouve $r = \frac{8}{10}$. Il y aura donc huit Aurores au solstice pendant qu'on en observe dix à l'équinoxe. Si l'on fait $n = 1,3$, on trouve $r = \frac{5}{10}$. Il y aura donc cinq Aurores au solstice pendant qu'il y en a dix à l'équinoxe. Or, ces nombres représentent bien l'ordre de grandeur des différences observées en moyenne.

Ce calcul n'est d'ailleurs qu'approximatif. Pour le faire avec plus de rigueur il faudrait tenir compte de ce que : 1° le nombre des Aurores produites après le coucher du Soleil croît moins vite que le temps compté à partir de la même origine (c'est-à-dire qu'il s'en produit davantage pendant la première heure que pendant la suivante); 2° le temps r écoulé entre le coucher du Soleil et la fin du crépuscule est plus petit à l'équinoxe qu'au solstice. On trouve alors pour r une valeur encore plus petite que celle écrite ci-dessus, c'est-à-dire que la différence des fréquences des Aurores aux deux époques est encore augmentée considérablement.

De la formule précédente un autre fait se dégage : on voit que plus n est petit et voisin de l'unité (c'est-à-dire plus la durée du crépuscule augmente, ce qui a lieu comme on sait à mesure qu'on s'élève en latitude), plus la valeur de r est faible, toutes choses égales d'ailleurs. Ce qui signifie qu'à mesure qu'on s'élève en latitude (et en ne considérant toujours que les latitudes moyennes) la différence entre les nombres des Aurores à l'équinoxe et au solstice devient plus grande. C'est effectivement ce qui résulte des nombres publiés dans le catalogue de Fritz (*loc. cit.*) et d'où il ressort qu'en Italie, par exemple, la différence entre les

nombres des Aurores aux équinoxes et aux solstices est moins grande que dans les régions plus septentrionales.

Pour faire le calcul précédent nous avons considéré, pour simplifier et conformément aux faits, que le nombre des Aurores observées, dans les régions plongées plus avant dans la nuit que la bande l de la figure précédente, est négligeable. *Mais ce nombre n'est pas nul* (car l'observation a montré, et nous l'avons établi théoriquement à propos de la période *diurne*, qu'il peut se produire des Aurores à toute heure de la nuit). Il s'ensuit que le rapport r écrit ci-dessus indique le rapport des nombres d'Aurores observées aux équinoxes et aux solstices, *par heure*, mais non pas la valeur de ce rapport *par nuit*, qui est différente, puisque les nuits n'ont pas la même durée à toute saison de l'année. Il s'ensuit que, puisque la nuit contient un nombre d'heures plus grand en hiver qu'en été, et que ce nombre d'heures est, aux équinoxes, plus grand qu'en été et plus petit qu'en hiver, *on doit observer un nombre total d'Aurores plus grand en hiver qu'en été; et la différence entre les nombres des Aurores en été et aux équinoxes, telle que nous l'avons calculée ci-dessus, doit être augmentée par cette circonstance; la différence de ces nombres entre l'hiver et les équinoxes doit être au contraire diminuée* (dans notre hémisphère). C'est effectivement et point pour point ce qui ressort des catalogues : ceux-ci, et notamment les courbes de M. Fritz, montrent en effet en moyenne : d'une part, qu'il y a moins d'Aurores en été qu'en hiver; d'autre part, que le nombre des Aurores en hiver est inférieur à leur nombre aux équinoxes, mais beaucoup moins que le nombre de l'été, conformément à ce que nous venons d'établir théoriquement.

L'inverse doit avoir lieu dans l'hémisphère sud. Malheureusement les données relatives à cet hémisphère sont encore trop peu nombreuses pour pouvoir le vérifier.

Mais les raisonnements que nous venons de faire ne s'appliquent qu'aux latitudes moyennes, aux stations situées entre le cercle polaire et l'équateur. Il est facile de voir que le caractère de la période annuelle doit progressivement se modifier quand on a dépassé le cercle polaire dans la direction du pôle. On sait en effet que l'atmosphère est encore éclairée par le crépuscule tant que le Soleil n'est pas descendu à 18° au-dessous de l'horizon ⁽¹⁾. Comme, au moment des équinoxes, la distance zénithale du Soleil au pôle est 90° , il s'ensuit que la nuit est remplacée alors par un crépuscule de 12 heures sur toute la région qui s'étend du pôle à $90^\circ - 18^\circ = 72^\circ$ de latitude nord; c'est-à-dire que dans cette région la plupart des Aurores qui se produisent au moment des équinoxes doivent rester invisibles par suite de la clarté du ciel. Au contraire, lors du solstice d'hiver, la nuit *complète* règne pendant près de 24 heures dans cette région, et

(1) WOLF, *Astronomie et Géodésie*, p. 144.

les conditions de visibilité des Aurores sont extrêmement favorables. En été, naturellement les Aurores deviennent totalement invisibles. Il s'ensuit que, dans les régions polaires situées *au-dessus de 72° environ de latitude nord, on doit observer le maximum de fréquence des Aurores au solstice d'hiver et le minimum aux équinoxes*. C'est effectivement ce que l'observation a démontré depuis longtemps. (Voir ci-dessus.) Ainsi, tandis qu'on observe les deux maxima des équinoxes et le minimum d'hiver à Saint-Petersbourg, Abo, Stockholm, Christiania, au contraire à Hammerfest, au nord de la Norvège (72° de latitude nord) il n'y a déjà plus qu'un seul maximum, au solstice d'hiver (1).

Période undécennale. — Quant à la période undécennale des Aurores boréales, qui jusqu'à ces dernières années avait paru comme la plus mystérieuse, elle est due à ce que, comme nous l'avons montré, l'intensité des ondes hertziennes émises par le Soleil doit être beaucoup plus grande lors des maxima de l'activité solaire. Il doit s'ensuivre, comme on l'a en effet depuis longtemps constaté, que les maxima et les minima de la fréquence des Aurores boréales coïncident respectivement avec ceux de la période des taches solaires.

Notre conception explique également pourquoi on ne doit pas observer, dans la fréquence des perturbations magnétiques et des Aurores, de période égale à la durée de rotation du Soleil : les radiations hertziennes engendrées dans les décharges électriques d'un point quelconque du disque solaire se propagent, en effet, également dans toutes les directions à partir de ce point.

Relations des Aurores boréales avec les perturbations magnétiques. — Nous avons vu, dans le Chapitre précédent, comment les variations de l'intensité des ondes hertziennes solaires, en augmentant la conductibilité des hautes couches de l'atmosphère, pouvaient, quand ces couches étaient animées de mouvements rapides (qui par suite de l'induction par le champ magnétique terrestre y produisent des forces électromotrices d'induction), y engendrer des courants électriques capables de perturber les aiguilles aimantées. La luminescence produite dans un gaz raréfié par les ondes hertziennes n'est en effet accompagnée de la production de courants agissant sur l'aiguille aimantée qu'autant que des forces électromotrices préexistent dans ce gaz. *Et l'on conçoit dans ces conditions que la production des Aurores boréales ne soit pas nécessairement accompagnée de perturbations magnétiques*, et qu'on observe fréquemment des Aurores boréales très brillantes sans perturbation magnétique notable.

Ainsi s'explique ce fait remarquable révélé par l'observation (voir ci-dessus, h) que, tout en présentant dans leur fréquence moyenne la même période undé-

(1) ANGOT, *Loc. cit.*, p. 127.

cennale, puisque l'un et l'autre sont engendrés par les ondes hertziennes, solaires, ces deux ordres de phénomènes soient fréquemment indépendants dans leurs manifestations isolées ; car les perturbations magnétiques dépendent en même temps d'un facteur terrestre variable : l'induction par la terre aux divers points de l'atmosphère.

Comme nous l'avons rappelé au début de ce Chapitre, l'expérience a montré que deux catégories particulières d'Aurores boréales sont assez souvent accompagnées de perturbations de l'aiguille aimantée : d'une part les grandes Aurores des latitudes moyennes qui s'étendent fréquemment sur une grande partie de la surface du globe ; d'autre part, parmi les Aurores limitées, et d'un caractère local, des régions polaires, celles qui sont animées de mouvements rapides. Il semble que notre conception explique aisément ces faits :

1° Nous avons vu que les Aurores boréales *étendues* des latitudes moyennes se produisent quand, par suite de perturbations particulièrement violentes de la surface solaire, l'intensité des ondes hertziennes solaires étant notablement augmentée, elles peuvent pénétrer dans des couches de l'atmosphère beaucoup plus basses que dans les conditions normales. On conçoit alors que, la conductibilité étant soudainement devenue très grande dans des couches atmosphériques où elle est d'ordinaire sensiblement nulle, et cela *sur toute la surface du globe*, il doit s'ensuivre, partout où cette portion de l'atmosphère est animée de mouvements rapides, des courants électriques subits et intenses, perturbant les aiguilles aimantées sur toute la Terre.

2° En ce qui concerne les Aurores ordinaires des régions polaires, qui ont une très faible étendue et un caractère local, *elles seront accompagnées de perturbations magnétiques notables chaque fois qu'elles se produiront dans une région de l'atmosphère animée de mouvements rapides*. Et effectivement (*voir ci-dessus, h*) l'expérience a montré que les Aurores, même peu brillantes, à mouvements rapides, sont accompagnées de perturbations relativement importantes de l'aiguille aimantée, et que celle-ci reste au contraire absolument calme pendant les Aurores tranquilles, fussent-elles même très brillantes.

Ici donc encore, tous les faits d'observations, et ceux précisément qui avaient semblé jusqu'ici les plus déconcertants, découlent immédiatement de notre conception.

Relations des Aurores boréales et des Nuages. — On sait que les rayons cathodiques ont la propriété de favoriser et de provoquer sur leur trajet la condensation de la vapeur d'eau. Ce fait, démontré par de nombreuses expériences faites ces dernières années, notamment par M. Wilson, donne la clef de la relation bien souvent constatée qui relie la formation des nuages à celle des rayons auroraux.

Les rayons cathodiques produits dans l'atmosphère supérieure par les ondes hertziennes solaires doivent favoriser sur leur trajet la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique sous forme de nuages, et notre théorie permet de prévoir : 1° que l'on doit fréquemment observer, là où peu auparavant se trouvaient des rayons d'Aurores boréales, des nuages de même forme et d'orientation identique; 2° que parfois les halos lunaires se produisant pendant une Aurore boréale doivent paraître faire partie de celle-ci (on sait en effet que les halos sont dus à la diffraction de la lumière lunaire par les gouttelettes des cirri); 3° que la fréquence annuelle des cirri, et par suite des halos lunaires, doit suivre une marche parallèle à celle des Aurores boréales.

Ce sont précisément les faits que l'on a fréquemment constatés depuis les observations anciennes de Tycho-Brahe sur ce sujet.

Nous avons tenu dans ce Chapitre à ne laisser de côté la discussion d'aucun des faits caractéristiques qu'a révélés l'observation continue des Aurores boréales. Il paraîtra peut-être que les conceptions que nous avons développées ici nous ont permis d'apporter quelques éléments nouveaux de solution dans les problèmes que soulève l'étude de ces phénomènes.



CHAPITRE VI.

SUR LES NÉBULEUSES.

Nos connaissances expérimentales actuelles sur les Nébuleuses sont loin d'être aussi étendues et précises que celles que nous possédons sur les phénomènes qui ont fait l'objet des Chapitres précédents; il s'ensuit que tout essai théorique sur les Nébuleuses doit avoir nécessairement un caractère assez hypothétique, puisque l'ensemble des faits d'observation qui peuvent lui servir de base et de criterium est encore très limité, et sur bien des points incertain.

Mais il nous a paru que si, quittant les limites du système solaire, on appliquait aux autres étoiles la considération d'un rayonnement électromagnétique analogue à celui du Soleil, on pourrait jeter quelque clarté sur plusieurs des problèmes les plus mystérieux de l'Astronomie nébulaire, et cela sans l'intervention d'aucune autre hypothèse, et simplement par l'application logique des résultats les plus modernes de la Physique; si à cela on ajoute l'intérêt philosophique que suscite naturellement dans tous les esprits tout ce qui touche au problème cosmogonique, l'objet de ce Chapitre se trouvera sans doute suffisamment justifié.

La question de savoir quelle est l'origine de la lumière des Nébuleuses a été à peu près complètement laissée de côté par ceux qui, jusqu'à ces dernières années, se sont occupés de ces astres et de la formation du système des mondes. Kant, Laplace et plus récemment Faye, etc., ont envisagé exclusivement les Nébuleuses au point de vue de la Mécanique, en se bornant à admettre, sans préciser davantage, que la lumière nébulaire était due à un état incandescent de la matière produit par des températures élevées.

Mais les plus récentes recherches semblent avoir démontré ⁽¹⁾ que, même aux plus hautes températures, la chaleur seule est incapable de faire émettre aux gaz un spectre de raies, et d'autre part on admet actuellement parmi les astronomes, pour diverses raisons déduites notamment de l'aspect particulier et invariable des Nébuleuses ⁽²⁾, que celles-ci ont une température très basse et voisine du zéro absolu.

⁽¹⁾ PRINGSHEIM, *Sur le rayonnement des gaz*, passim. (*Rapports du Congrès de Physique*, 1900.)

⁽²⁾ *Revue générale des Sciences*, 1902, p. 75-76.

Ce problème a préoccupé ces dernières années plusieurs astrophysiciens et des solutions différentes ont été proposées par M. Arrhénius, par M. Deslandres et par nous-même.

Nous allons les passer rapidement en revue.

I. M. Arrhénius ⁽¹⁾ explique la luminescence des Nébuleuses par les décharges que doivent produire, selon lui, dans les gaz nébulaires, les particules négativement chargées, lancées dans l'espace par le Soleil et les étoiles grâce à la pression de radiation de leur rayonnement. D'après M. Arrhénius, ce seraient les parties extérieures seules des Nébuleuses qui captent ces particules chargées, et seules par suite émettraient de la lumière; et M. Arrhénius voit une confirmation de son hypothèse dans le fait que diverses Nébuleuses, et notamment les Nébuleuses annulaires, émettent de la lumière principalement par leurs parties extérieures.

Mais, d'une part, nous avons vu ⁽²⁾ qu'il est bien difficile d'admettre que les particules repoussées des astres et soumises dès leur départ et pendant tout leur trajet au rayonnement ultra-violet de ceux-ci, puissent conserver une charge négative suffisante pour produire dans les gaz nébulaires les décharges lumineuses que suppose M. Arrhénius. D'autre part, s'il est vrai que plusieurs Nébuleuses ont leur plus grand éclat sur leurs bords, il convient de remarquer que tel n'est pas le cas général et qu'un grand nombre d'autres, et notamment plusieurs Nébuleuses planétaires, ont leur éclat maximum au centre et que la lumière y décroît rapidement du centre vers les parties extérieures. Enfin les apparences des Nébuleuses en spirales (qui sont les plus nombreuses) sont inexplicables dans l'hypothèse de M. Arrhénius, qui d'ailleurs n'en parle même pas dans son Mémoire, bien qu'elles constituent la forme la plus générale.

Pour toutes ces raisons la théorie de M. Arrhénius sur ce point ne nous paraît guère admissible.

II. La théorie présentée par M. Deslandres pour expliquer la lumière des Nébuleuses a été publiée peu après la nôtre; elle a fait l'objet de plusieurs Notes présentées à l'Académie des Sciences par M. Deslandres et par nous.

Dans une première Communication ⁽³⁾, présentée le 26 mai 1902, M. Deslandres essayait d'appliquer à l'explication des Nébuleuses l'hypothèse d'un rayonnement cathodique des astres qui avait déjà, comme nous l'avons vu, été développée sur d'autres points par Goldstein, Birkeland, et par lui-même. A la suite

⁽¹⁾ *Loc. cit.*

⁽²⁾ Voir ci-dessus, Chap. V.

⁽³⁾ *Comptes rendus*, 1902.

d'une Note présentée par nous à l'Académie le 2 juin 1902 ⁽¹⁾ et dans laquelle nous énumérions quelques-unes des objections que nous paraissait soulever l'explication de M. Deslandres, celui-ci, dans une seconde Communication (23 juin 1902) ⁽²⁾, éclaircissait sur certains points et complétait sur d'autres sa Note primitive.

Telle qu'elle ressort définitivement de ces deux Notes, la théorie de M. Deslandres peut se résumer ainsi :

Après avoir rappelé la généralité de la structure en spirale dans les Nébuleuses que toutes les observations modernes et surtout les belles recherches photographiques de Roberts ont nettement établie, M. Deslandres rappelle son opinion que « la forme spirale des Nébuleuses implique une force répulsive émanée du noyau » et que la lumière des Nébuleuses comme la force répulsive doit provenir du noyau. Et il émet les hypothèses suivantes : 1° le noyau des Nébuleuses doit émettre un rayonnement cathodique intense ; 2° les gaz nébulaires sont concentrés autour de particules de condensation liquides ou solides qui sont repoussées par les rayons cathodiques émanés du noyau ; 3° ces particules sont électrisées ; 4° le noyau de la Nébuleuse possède d'autre part un état magnétique analogue à celui de la Terre et qui aurait pour effet de courber suivant des spires les particules électrisées et repoussées du centre ; 5° la lumière de la Nébuleuse est produite par les rayons cathodiques émanés du centre.

M. Deslandres explique la structure des Nébuleuses en spirale, grâce à ces cinq hypothèses distinctes dont aucune, semble-t-il, n'est imposée par les faits, et dont plusieurs paraissent soulever diverses objections :

On ne voit pas, notamment, pour quelles raisons physiques et sous l'influence de quelles forces le noyau des Nébuleuses doit émettre un rayonnement cathodique intense ; M. Deslandres pense ⁽³⁾ que ce rayonnement du noyau nébulaire est analogue à celui des corps radioactifs. Mais il paraît difficile d'admettre qu'un état de la matière qui, sur la Terre, ne se trouve réalisé que d'une manière exceptionnelle et extrêmement rare, se trouve exister d'une manière prépondérante dans toutes les Nébuleuses.

L'hypothèse d'un état magnétique des Nébuleuses analogue à celui de la Terre ne s'impose pas davantage à l'esprit, non plus que celle de l'électrisation des particules solides qui, d'après cette théorie, se trouvent dans les Nébuleuses.

Enfin, si l'illumination des gaz nébulaires était due à des rayons cathodiques émanés du noyau, les raies émises par les régions centrales devraient être beaucoup plus brillantes que celles des parties extérieures, car : 1° l'intensité du rayonnement cathodique doit, d'après cette théorie, diminuer avec la distance

⁽¹⁾ *Comptes rendus*, 1902.

⁽²⁾ *Ibid.*

⁽³⁾ *Loc. cit.*

au noyau; 2° on sait, notamment par les expériences de Lénard ⁽¹⁾ que l'illumination produite par des rayons cathodiques donnés est d'autant plus vive que la pression du gaz traversé est plus grande, et la pression dans les Nébuleuses globulaires doit augmenter des parties extérieures vers le centre, par suite de la gravitation. Or, notamment dans le cas des Nébuleuses annulaires, c'est l'inverse qui a lieu et la plus grande illumination des gaz existe dans les parties extérieures ⁽²⁾. Et malgré toute la déférence due à l'autorité de M. Deslandres, il ne nous semble pas, en somme, que cette théorie, qui accumule plusieurs hypothèses distinctes, dont aucune n'est imposée par les faits, et qui fait intervenir des forces multiples dont les effets combinés n'expliquent qu'incomplètement les résultats de l'observation, puisse être considérée comme une solution définitive de la question.

III. Il nous reste à exposer brièvement les idées personnelles que nous avons émises à ce sujet.

Sans autre hypothèse que l'application aux autres étoiles de l'idée d'un rayonnement hertzien analogue à celui du Soleil, et par la simple considération des différences de densité qui doivent se produire dans les masses gazeuses de matière nébulaire, sous l'influence de la gravitation et des mouvements de rotation et autres auxquels peuvent être soumises ces masses, il semble que l'on peut rendre compte simplement des aspects si divers des Nébuleuses en spirales, des Nébuleuses annulaires, des Nébuleuses planétaires, des Nébuleuses à condensation centrale, etc., et de toutes leurs particularités spectrales.

Des travaux récents, et ceux notamment de J.-J. Thomson, ont montré que, dans l'illumination des gaz raréfiés par les ondes hertziennes, il existe une *pression critique*, variable d'ailleurs avec les gaz, et pour laquelle la luminescence produite a un éclat maximum (l'illumination étant beaucoup moins vive pour des pressions plus petites ou plus grandes) et que, d'autre part, les gaz rendus lumineux par les ondes hertziennes exercent sur celles-ci le rôle d'écrans d'une

⁽¹⁾ *Loc. cit.*

⁽²⁾ Il n'y a pas que les Nébuleuses annulaires qui présentent ce caractère d'être surtout lumineuses par leurs parties extérieures; parmi les Nébuleuses planétaires, un certain nombre offrent l'apparence de disques nébuleux dont l'éclat est aussi grand sur les bords qu'au centre. Arago remarquait judicieusement à ce sujet (*Astronomie populaire*, t. I, p. 526) : « Pour expliquer comment l'éclat des disques planétaires nébuleux (*nébuleuses planétaires*) n'est guère plus fort au centre que vers les bords, il faut admettre que la lumière ne provient pas de toute la profondeur de la Nébuleuse (sans cela son intensité augmenterait avec le nombre des particules matérielles et rayonnantes contenues dans la direction de chaque rayon visuel); il faut réduire le rayonnement à être pour ainsi dire superficiel ». Il faut accorder, en d'autres termes, que la luminosité de ces Nébuleuses provient en majeure partie d'une couche sphérique extérieure, tandis que le noyau lui-même et les parties internes à cette couche sphérique, quoique plus denses, sont, contrairement à ce qui se produirait si la théorie de M. Deslandres était exacte, relativement obscurs.

manière d'autant plus intense que la lumière produite par ces ondes est elle-même plus vive.

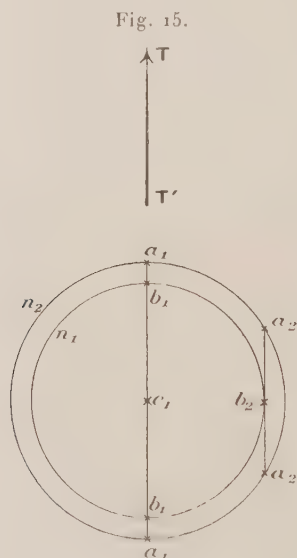
Considérons une masse nébulaire gazeuse ; à l'état d'équilibre normal, et qui n'est d'ailleurs réalisé qu'exceptionnellement, comme cela résulte depuis longtemps des observations, cette masse prend une forme circulaire, et telle que, par suite de la gravitation, la densité du gaz va en décroissant du centre à la périphérie :

1° Si la pression au centre de cette masse est voisine de la *pression critique* précédemment considérée ou plus grande, les parties extérieures et moins denses sont relativement peu illuminées par les ondes hertziennes qui arrivent des différents points de l'espace ; elles sont, comme telles, assez transparentes pour ces ondes qui, arrivant jusqu'au centre de la Nébuleuse, y produisent une luminescence intense : c'est le cas des *Nébuleuses à condensation centrale et d'un certain nombre de Nébuleuses planétaires*, en particulier.

2° Si, au contraire, la pression au centre de la masse nébulaire est plus grande que la pression critique, les zones gazeuses possédant cette pression critique, et qui sont en même temps les zones d'illumination maxima, seront extérieures au noyau et comprises, par exemple, entre deux couches de niveau n_1 et n_2 .

Deux cas extrêmes pourront se présenter selon que la forme d'équilibre de la Nébuleuse est voisine d'une sphère ou d'un ellipsoïde très aplati :

a. Soit d'abord le cas d'une Nébuleuse à peu près sphérique ; soient n_1 et n_2



les deux surfaces de niveau concentriques entre lesquelles se trouve la région gazeuse possédant une pression égale à la pression critique ou voisine de

celle-ci ; soit, d'autre part, TT' le rayon visuel mené de la Terre à la Nébuleuse ; si, pour simplifier, on considère la lumière de la Nébuleuse comme ne provenant que de la couche sphérique d'illumination maxima $n_1 n_2$, un observateur, placé sur la Terre, recevra du centre de la Nébuleuse une lumière proportionnelle à $2a_1 b_1$ et du bord une lumière maxima proportionnelle à $2a_2 b_2$; or R_1 et R_2 étant les rayons des couches n_1 et n_2 (*fig. 15*), on a

$$\begin{aligned} a_1 b_1 &= R_2 - R_1 \\ a_2 b_2 &= \sqrt{R_2^2 - R_1^2}. \end{aligned}$$

La quantité de lumière reçue du bord de la Nébuleuse est donc un peu plus grande que celle reçue du centre ⁽¹⁾ ; mais elle diffère d'autant moins de celle-ci que R_1 est plus voisin de R_2 ; et, d'autre part, si l'on remarque que, outre la lumière émise par $a_1 b_1$, le centre de la nébuleuse nous envoie également la lumière (plus faible il est vrai) émise par la région $b_1 c_1$ (qui possède une pression inférieure à la pression critique, mais n'en est pas moins illuminée faiblement), il s'ensuit que ce supplément de lumière reçu du centre doit nous faire apparaître souvent celui-ci comme aussi lumineux que le bord, et, par suite, fréquemment la Nébuleuse doit nous apparaître comme *un disque à peu près uniformément éclairé sur toute sa surface*. Tel est effectivement le phénomène qu'on observe dans un grand nombre de Nébuleuses planétaires, et qui étonnait si fort les contemporains d'Arago (*voir* la Note du § II) et William Herschel ⁽²⁾.

b. Soit maintenant le cas d'une Nébuleuse dont la figure d'équilibre est un ellipsoïde aplati ; on démontre en Mécanique céleste ⁽³⁾ que, dans ce cas, l'aplatissement des couches de niveau successives va en augmentant rapidement à mesure qu'on s'éloigne du centre vers l'extérieur.

Le calcul montre alors facilement que *la lumière reçue du bord de la Nébuleuse pour un observateur terrestre est proportionnellement beaucoup plus grande par rapport à celle reçue du centre que dans le cas précédent* ; la figure ci-dessous permet de se rendre aisément compte de ce fait ; soient n_1 et n_2 les deux couches de niveau sphériques de la figure précédente ; N_1 et N_2 deux ellipses circonscrites et également aplaties ; on voit facilement que la longueur $A_2 B_2$ est égale à $a_2 b_2$; il s'ensuit que si, dans les Nébuleuses ellipsoïdales, les couches de niveau suc-

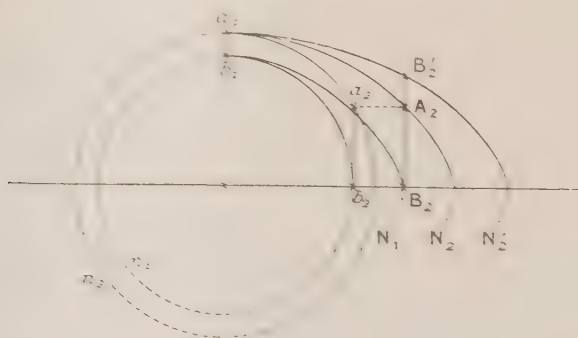
⁽¹⁾ En réalité, pour que ce raisonnement fût absolument rigoureux, il faudrait tenir compte de ce fait que la lumière de la nébuleuse, qui nous vient de l'hémisphère opposé à nous, subit l'absorption de la masse interposée de la nébuleuse. Mais il est facile de voir que ce résultat du raisonnement n'en serait pas modifié.

⁽²⁾ ARAGO, *Astronomie populaire*, t. I, p. 525.

⁽³⁾ Voir notamment RESAL, *Mécanique céleste*, p. 267-272 et *passim*.

cessives étaient également aplaties, les proportions de lumière reçues du centre et des bords (et supposées, pour simplifier, émaner exclusivement de la couche d'illumination maxima) seraient les mêmes que dans les Nébuleuses sphériques, toutes choses égales d'ailleurs; mais, en réalité, il n'en est rien, car la couche de niveau extérieure qui limite la couche d'illumination maxima est non pas N_2 , mais une surface ellipsoïdale beaucoup plus aplatie N'_2 , et la lumière reçue du bord de la nébuleuse est proportionnelle non plus à A_2B_2 , mais à $A_2B_2 + A_2B'_2$ (fig. 16). Il s'ensuit que fréquemment, dans ce cas, la Nébuleuse doit nous

Fig. 16.



apparaître comme un anneau lumineux relativement bien plus brillant que les régions centrales ⁽¹⁾. C'est le cas des *Nébuleuses annulaires* (celles de la Lyre, du Cygne, etc.).

Si les raisonnements précédents sont exacts, on doit s'attendre à ce que les Nébuleuses régulières présentant l'aspect d'une surface uniformément éclairée soient le plus souvent rondes, et à ce que les Nébuleuses annulaires soient plutôt elliptiques; *or c'est exactement ce que l'on constate*; toutes les Nébuleuses annulaires connues ont une apparence nettement elliptique, tandis que la plupart des Nébuleuses planétaires à éclaircissement uniforme ont la forme de disques circulaires.

3° Mais les cas d'équilibre normal que nous venons d'examiner ne sont réalisés que rarement, et, en général, sous l'influence de simples différences de vitesse entre deux filets contigus de matière, il doit se produire, comme l'a montré Faye ⁽²⁾, un mouvement tourbillonnaire lent de la Nébuleuse. Par suite d'un pareil mouvement cyclonique et sous l'influence combinée de la gravitation et de la force centrifuge, les zones gazeuses qui possèdent la pression cri-

⁽¹⁾ Si ces conceptions sont exactes, les Nébuleuses annulaires doivent avoir l'aspect, non pas d'anneaux lumineux aux bords bien délimités, mais au contraire d'anneaux dont les bords vont en s'estompant vers le centre et vers l'extérieur. Il suffit de se reporter notamment aux belles photographies de la nébuleuse de la Lyre, par Roberts et par Rabourdin, pour s'assurer qu'il en est bien ainsi.

⁽²⁾ FAYE, *Cosmogonie*.

tique et qui sont en même temps les régions de la plus grande illumination, affectent des formes en spirales. C'est ce qu'on observe dans les *Nébuleuses* dites *en spirales*, telles que celle des Chiens de Chasse, celle de la Grande Ourse, etc. On sait que les recherches photographiques modernes, notamment de Roberts, ont établi que cette forme de Nébuleuses est la plus fréquente, ce qui est conforme aux idées de Faye.

Il nous reste, pour terminer, à répondre à l'objection que, dans sa communication du 23 juin 1902, M. Deslandres a opposée aux vues développées ci-dessus et que nous avons succinctement esquissées dans notre Note du 2 juin.

Rappelant que nous attribuons la lumière des Nébuleuses aux ondes hertziennes qui leur arrivent des différentes étoiles, M. Deslandres s'exprimait ainsi dans cette communication : « Cette explication est inadmissible ; car, par l'effet des mêmes causes, l'atmosphère terrestre devrait avoir la nuit un éclat au moins égal... » Il est incontestable, en effet, qu'il devrait en être ainsi si toutes les conditions favorables à la production d'une luminescence électrique étaient identiquement les mêmes dans tous les points de l'espace céleste, et en particulier identiques dans notre atmosphère à ce qu'elles sont dans les Nébuleuses. Or :

1. Toutes choses égales d'ailleurs, il faudrait, pour que l'illumination de notre atmosphère par les ondes hertziennes venues des étoiles fût aussi vive que celle d'une Nébuleuse, que l'intensité totale des radiations reçues des étoiles par celle-ci ne fût pas supérieure à l'intensité totale du rayonnement stellaire reçu par notre atmosphère pendant la nuit. Or, on sait que l'étoile la plus rapprochée de nous se trouve à 3 ans 6 mois de lumière, et il serait difficile d'affirmer que toutes les masses de gaz nébulaires répandues dans l'espace se trouvent à une distance aussi considérable des étoiles les plus voisines. En d'autres termes, l'illumination d'une masse donnée de gaz nébulaire dépend de la distribution, du nombre, de la concentration plus ou moins grande des étoiles dans les régions voisines de l'espace. Et si les vues exposées ci-dessus sont exactes, les condensations lumineuses des Nébuleuses ne correspondent pas nécessairement à une condensation de matière plus grande que dans d'autres régions du ciel qui nous apparaissent obscures, mais seulement à leur proximité plus grande des étoiles voisines.

2. Pour que l'illumination de notre atmosphère par les ondes hertziennes venues des étoiles fût égale à celle d'une Nébuleuse visible, il faudrait d'autre part, et toutes choses égales d'ailleurs, que la température des régions de notre atmosphère susceptibles d'être illuminées électriquement fût aussi basse que celle de la région du ciel où se trouve cette Nébuleuse. Il résulte en effet de

nombreuses recherches expérimentales, notamment de celles de J. Stark ⁽¹⁾, que la luminosité électrique d'un gaz est d'autant plus grande que la température est plus basse; ainsi M. Ramsay et ses collaborateurs ont été frappés, à l'Institut royal de Londres, de l'éclat extraordinaire que prennent, aux températures voisines de celle de l'air liquide, les gaz illuminés par une excitation même très faible. Or, peut-on affirmer que la température nocturne des régions élevées de notre atmosphère ne soit pas, notamment par suite du rayonnement nocturne de la surface terrestre, notablement plus élevée que celle de tous les points de l'espace où nous voyons des Nébuleuses?

3. On sait enfin que pour une même excitation électrique, et pour la même température, l'intensité de la luminescence produite dans un gaz dépend essentiellement de la nature de celui-ci. En particulier, l'hydrogène [qui, comme on sait, est un constituant des Nébuleuses ⁽²⁾] s'illumine bien plus brillamment que l'azote, et entre des limites de pressions bien plus étendues ⁽³⁾. Quant au *nébulum*, nous n'en pouvons pas parler, puisque sa nature est encore totalement inconnue.

Il semble que, dans ces conditions, l'objection de M. Deslandres ne peut pas subsister.

Certes, les vues exposées dans ces pages, sur la constitution des Nébuleuses, ont nécessairement un caractère assez hypothétique comme tout ce qui concerne notre connaissance de ces astres, et elles doivent être acceptées avec toute la réserve que commande un sujet aussi mystérieux à tant d'égards.

Néanmoins, il nous a paru qu'elles n'étaient pas indignes d'être exposées ici, comme ne reposant que sur une hypothèse unique, logiquement déduite des faits et qui rend compte simplement de la plupart des apparences observées, en ne s'appuyant que sur des données précises de la Physique et de la Mécanique céleste.

Nous allons voir, dans un dernier Chapitre, que les phénomènes extraordinaires auxquels a donné lieu la nouvelle étoile de Persée semblent apporter une confirmation imprévue à ces idées sur les Nébuleuses.

⁽¹⁾ J. STARK, *loc. cit.*

⁽²⁾ *Scheiner's astronomical Spectroscopy*, p. 224 et *passim*.

⁽³⁾ RAMSAY, *Rev. gén. des Sciences*, 1902, p. 810.

CHAPITRE VII.

SUR LA NÉBULEUSE DE LA NOUVELLE ÉTOILE DE PERSÉE.

On sait que, à la suite de l'observation faite par M. Flammarion, que la Nova de Persée, photographiée avec un réfracteur, paraissait entourée d'une auréole lumineuse (qui fut d'ailleurs reconnue être d'origine purement optique), on étudia soigneusement, dans plusieurs observatoires d'Europe et d'Amérique, le ciel au voisinage de la Nova, ce qui fit découvrir divers phénomènes d'une apparence étonnante. M. Max Wolf, de Heidelberg, annonça qu'il avait découvert, tout près de la Nova, une nébulosité très faible; les photographies obtenues ensuite à l'observatoire Yerkes par M. Ritchey, et à l'observatoire Lick par M. Perrine, confirmèrent ce fait; toutes montrèrent que la Nébuleuse était à peu près concentrique à l'étoile et semblait nettement lui appartenir. L'intensité lumineuse était d'ailleurs très inégale dans les différents points; et en certains endroits, notamment du côté sud de l'étoile, il y avait des condensations lumineuses particulièrement nettes et vives.

De plus, les photographies, prises ensuite régulièrement pendant plusieurs mois par M. Ritchey et M. Perrine, mirent bientôt hors de doute que les principales condensations lumineuses s'éloignaient progressivement de l'étoile avec un mouvement apparent très rapide. Voici d'ailleurs, rapidement résumés, les principaux faits qui ressortent de l'examen des séries de clichés de MM. Perrine et Ritchey (1) :

1° Dans l'apparente complication de structure des nébulosités entourant la Nova, on peut distinguer deux zones principales de lumière : la première consiste en un anneau assez brillant et d'ailleurs très irrégulier dans sa structure et l'éclat relatif de ses diverses parties, et qui, en janvier 1902, avait environ 15' de diamètre; la deuxième est également annulaire et à peu près concentrique à la Nova, et, en janvier 1902, elle avait un diamètre d'environ 30'.

2° Ces deux zones annulaires se dilatent et semblent s'éloigner de la Nova. Une comparaison des photographies prises notamment en janvier et en

(1) *Bulletin of the Lick Observatory*, 1902.

mars 1902 montre que le mouvement d'expansion de ces deux zones, déduit du déplacement apparent sur les clichés des principales condensations lumineuses, indique que le déplacement radial quotidien par rapport à l'étoile est :

Pour l'anneau intérieur, d'environ $1'',4$;

Pour l'anneau le plus extérieur, d'environ $2'',8$.

En considérant ces vitesses comme caractérisant la rapidité moyenne d'expansion de ces deux zones annulaires, depuis leur formation, on trouve que toutes deux ont dû se former vers le 17 février 1901, c'est-à-dire précisément au moment de l'explosion subite qui, au moment de l'apparition de la Nova, lui a donné pendant quelques jours un éclat extraordinaire; et ceci ne laisse, semble-t-il, plus de doute sur la réalité de la connexion entre les deux ordres de phénomènes.

3° Les deux zones lumineuses principales ont une structure très compliquée. Plusieurs des condensations séparées ont des mouvements individuels qui ne sont pas radiaux à l'étoile, mais contiennent des composantes tangentielles importantes. Certaines condensations paraissent même s'être rapprochées de l'étoile dans leurs déplacements.

4° L'éclat général de la nébulosité semble s'être rapidement affaibli; cependant vers les parties extérieures des masses de nébulosité sont devenues visibles, qui ne l'étaient pas sur les clichés précédents.

5° Le déplacement radial apparent des principales condensations a toujours été accompagné de notables changements de formes de celles-ci.

Ces phénomènes, d'une apparence si nouvelle et si extraordinaire, et dont la réalité n'était cependant pas contestable, car les documents photographiques nombreux pris en divers endroits étaient parfaitement concordants, ont beaucoup occupé l'attention des astrophysiciens.

Plusieurs astronomes américains, et notamment Pickering, ont suggéré (et telle était en effet la première explication qui se présentât d'elle-même) qu'il s'agissait de mouvements réels de la matière projetée par l'explosion qui a donné lieu à l'apparition de la Nova, à des distances énormes de celle-ci.

Si réellement les apparences observées étaient dues à une projection de matière expulsée de l'étoile, cette matière serait donc animée d'un mouvement apparent sur la sphère céleste de $17'$ par an. On appréciera l'énormité de cette vitesse si l'on remarque que le mouvement le plus rapide observé dans les étoiles jusqu'ici est inférieur à $9''$ par an, soit environ 115 fois moindre.

D'ailleurs, comme M. Véry l'a indiqué (¹), la vitesse radiale maxima indiquée par l'analyse spectrale de la Nova, et qui, correspondant à un déplacement

(¹) *Astron. Nachr.*, 21 février 1902.

de 3^{me} de la raie $H\delta$, est d'environ 2200^{km} par seconde, aurait conduit la matière expulsée de l'étoile à une distance qui, étant donnés les déplacements apparents de la Nébuleuse observés sur les clichés, correspondrait pour la Nova à une parallaxe d'environ $2''$. Or, il résulte des observations méridiennes du Dr Courvoisier à Heidelberg, de MM. Tucker et Aitken à Lick, de M. Chase à New Haven (qui toutes conduisent séparément au même résultat), que la parallaxe de la Nova est certainement inférieure à $\frac{1}{10}$ de seconde d'arc.

D'autre part, les mouvements observés dans la Nébuleuse sont loin d'être radiaux; presque tous ont des composantes tangentielles importantes, variables d'ailleurs avec les condensations et irrégulières. Or ceci est inconciliable avec l'hypothèse d'une projection effective de matière loin de la Nova.

Enfin, si cette hypothèse était exacte, on devrait s'attendre à ce que la lumière décroisse partout et progressivement à mesure que la Nébuleuse s'éloigne de l'étoile; or, s'il est vrai que, en général, l'éclat de la Nébuleuse a rapidement décroché avec le temps, en revanche, et spécialement dans les parties extérieures, il a surgi des condensations lumineuses nouvelles et très brillantes.

Il semble donc que cette hypothèse n'est pas satisfaisante, et l'on a en effet cherché autre chose.

M. Kapetyn, ⁽¹⁾ et presque simultanément, M. Wilson et M. Seeliger ⁽²⁾, directeur de l'Observatoire de Munich, ont proposé séparément une théorie en apparence fort séduisante de ces phénomènes :

Dans cette hypothèse, les apparences observées seraient dues à l'éclairement successif, par la lumière intense émanée de la Nova au moment de son apparition, des traînées gazeuses de matière nébuleuse répandues dans l'espace autour de la Nova. La vitesse des déplacements observés serait donc celle de la lumière elle-même, et effectivement une pareille vitesse correspond pour la Nova à une parallaxe d'environ $\frac{1}{38}$ de seconde d'arc, ce qui est bien conciliable avec le fait révélé par l'observation, que cette parallaxe doit être inférieure à $\frac{1}{10}$ de seconde.

De plus, la plupart des faits d'observation paraissent s'appliquer assez bien par cette hypothèse, et il nous suffira, pour plus de détails sur cette concordance, de renvoyer au Mémoire de M. Kapetyn. M. Kapetyn concluait ainsi ce Mémoire : « La grande question est donc celle-ci : Peut-on vraiment admettre que, dans les conditions de la Nova, la lumière réfléchie soit assez intense pour impressionner d'une manière si remarquable la plaque photographique ? »

Or, M. Turner, par un raisonnement analogue au suivant, a montré comment on peut résoudre cette question :

La lumière emploie (au moment où le calcul a été fait) 8 mois pour aller de la

⁽¹⁾ *Astron. Nachr.*, n° 3736, 20 décembre 1901.

⁽²⁾ *Id.*, n° 3769, 3 janvier 1902.

Nova à la nébulosité et 8 minutes pour aller du Soleil à la Lune; étant donnée la grandeur de l'étoile au moment de son apparition, et en tenant compte de la parallaxe qui correspondrait au déplacement des nébulosités avec une vitesse égale à celle de la lumière, on trouve que l'éclat de la Nova a dû être environ 5000 fois celui du Soleil. Or, avec l'instrument de M. Ritchy, la Lune donne en 0^s,003 une impression sur la plaque photographique égale en intensité à celle que donne sur une plaque identique la nébuleuse de la Nova en 20 minutes. D'autre part, l'éclat de la nébuleuse par rapport à celui de la Lune est pour un observateur terrestre comme $(30 \times 24 \times 60)^2$ est à 5000. Si donc on désigne par $\frac{1}{n}$ le rapport du pouvoir réflecteur (de l'albedo, autrement dit) de la nébuleuse à celui de la Lune, on a l'équation

$$\frac{20 \times 60}{0,003} = \frac{(30 \times 24 \times 60)^2}{5000} \times n,$$

ce qui donne sensiblement $n = 1$. C'est-à-dire que, pour pouvoir considérer comme acceptable l'hypothèse que les apparences de la nébulosité autour de la Nova sont dues à un éclaircissement produit par la lumière de celle-ci, il faut admettre que le pouvoir réflecteur de la matière nébuleuse gazeuse est égal à celui de la Lune. Or on sait que la Lune paraît composée à sa surface de matière extrêmement réfléchissante, et il semble impossible de concevoir que la matière nébuleuse qui est gazeuse et raréfiée possède un albedo égal ou même du même ordre de grandeur.

Enfin M. Perrine, avec un appareil analogue à celui qui avait permis d'étudier la polarisation de la lumière coronale, lors de l'éclipse solaire de 1900, fit une série d'expériences photographiques très soignées, dans le but d'étudier celle de la lumière émise par la Nébuleuse de la Nova. Or, tandis que cet appareil avait révélé dans la couronne solaire une proportion notable de lumière polarisée et que le même appareil, adapté sur le télescope de l'Observatoire Lick et dirigé vers une étoile quelconque, dont la lumière était au préalable réfléchi sur un miroir d'héliostat incliné sous l'angle de polarisation, permettait d'obtenir l'extinction totale de l'image extraordinaire, la Nébuleuse de la Nova de Persée donna toujours sur la plaque, et quelle que fût la position du prisme-nicol, une image ordinaire et une image extraordinaire, dont les intensités ne présentaient pas la plus petite différence appréciable (¹). Il en résulte incontestablement (ce que tendaient déjà à prouver les raisonnements précédents) que la majeure partie de la lumière de la nébulosité de la Nova n'est certainement pas de la lumière réfléchi, comme le supposaient MM. Kapetyn et Seeliger.

(¹) Voir *Bulletin of the Lick Observatory*, n° 22, 1902.

Le problème demeurerait donc entier et tout aussi mystérieux. Or, voici la solution que nous en avons proposée ⁽¹⁾, alors que les expériences polariscopiques de Perrine, qui la confirment entièrement, ne nous étaient d'ailleurs pas encore connues :

Lors du cataclysme, d'ailleurs inconnu, qui a donné lieu à l'apparition subite et brillante de la Nova de Persée, il a dû certainement se produire, comme dans les éruptions du Soleil, des ruptures brusques d'équilibre électrique, accompagnées de décharges électriques de la violence desquelles nous ne pouvons nous faire aucune idée ; les ondes hertziennes intenses, produites dans ces décharges et rayonnant dans l'espace autour de la Nova, ont dû y produire les phénomènes suivants :

Là où ces ondes ont rencontré des traînées gazeuses de matière nébulaire répandues dans l'espace, elles ont dû les illuminer, en vertu de leurs propriétés connues, et cela d'autant plus brillamment que ces masses gazeuses étaient plus voisines de la Nova et que, d'autre part, la pression qui y régnait était plus voisine de la *pression critique* qui correspond à l'illumination maxima.

Donc :

1° Quelles que soient d'ailleurs la distribution et l'orientation (que nous supposons quelconques) des traînées gazeuses répandues dans le ciel au voisinage de la Nova, la propagation des ondes hertziennes se faisant tout autour de celle-ci avec la vitesse de la lumière, il s'ensuit que l'ensemble des régions successivement illuminées a paru former autour de l'étoile une série d'anneaux dont chacun se propageait avec la vitesse uniforme de la lumière. Mais les vitesses apparentes de ces anneaux s'éloignant de l'étoile nous ont paru différentes, selon que les ondes hertziennes excitatrices étaient émises par l'étoile dans une direction plus ou moins oblique au rayon visuel.

Ainsi s'explique l'existence de deux zones principales d'illumination, observées sur les clichés et dont l'une semblait se dilater avec une vitesse plus grande que l'autre. Les vitesses réelles sont identiques ; ce qui diffère, ce sont leurs projections sur la sphère céleste.

2° La forme à peu près annulaire de la zone illuminée ne correspondant en réalité à aucune distribution annulaire réelle de la matière autour de l'étoile, cette zone doit avoir une structure très compliquée et irrégulière, qui dépend à la fois de l'orientation des diverses masses gazeuses autour de l'étoile et de la distribution des densités dans ces masses ; ainsi, les régions dans lesquelles le gaz nébulaire était voisin de la pression critique ont paru, dans l'anneau lumineux, comme des condensations particulièrement brillantes.

3° D'une manière générale, l'éclat de la nébulosité a dû décroître avec le

(1) Voir *Rev. gén. des Sciences*, 1902, p. 388.

temps, à mesure que, les ondes hertziennes s'éloignant de la Nova, leur intensité diminuait.

Cependant, dans certaines directions radiales à la Nova, les ondes hertziennes ont pu ne rencontrer de régions gazeuses, voisines de la pression critique, qu'après un assez long trajet; il a donc pu et dû arriver que, dans certaines directions, et assez loin de l'étoile, il apparaisse des condensations lumineuses nouvelles et très brillantes, comme on l'a en effet constaté.

4° Les condensations lumineuses correspondant aux régions qui possèdent la pression critique, et celles-ci ayant dans l'espace, par rapport à la Nova, des orientations quelconques, le déplacement apparent des condensations lumineuses s'est fait dans des directions variables, non nécessairement radiales à l'étoile, et possédant des composantes tangentiellles importantes.

Dans le cas même d'une bande gazeuse, orientée de telle manière que son extrémité la plus éloignée de la Nova se projetait sur la sphère céleste en un point plus rapproché d'elle que l'autre extrémité, la condensation lumineuse a paru se rapprocher de la Nova.

5° Enfin, la lumière produite dans ces conditions étant une lumière *émise* et non *réfléchi*e par la nébulosité, *elle n'est pas polarisée*.

Or, ces caractères des phénomènes, déduits immédiatement de notre conception, sont précisément tous ceux que l'observation a permis de constater. Ils apportent, semble-t-il, une confirmation aux idées exposées dans le Chapitre précédent, à propos des Nébuleuses.

APPENDICE AU CHAPITRE II.

Nous indiquons ci-dessous les publications diverses (que, pour la plupart, M. Mascart a bien voulu, avec une bienveillance dont nous lui sommes profondément reconnaissant, mettre à notre disposition, au Bureau central météorologique) où nous avons trouvé les observations utilisées dans cette partie de notre travail; dans un certain nombre de cas, les moyennes ont été trouvées toutes faites à la fin des Volumes; nous les avons alors toutes vérifiées; dans d'autres cas, où les moyennes n'avaient pas été établies, nous les avons calculées nous-même. Nous avons tenu compte (chaque fois que ces corrections avaient été déterminées) des corrections à faire par suite de changements apportés dans l'exposition des appareils thermométriques (comme cela a été le cas, par exemple, pour Zi-Ka-Wei), pour donner, aux résultats de toute la série des années d'observation de chaque station, l'homogénéité nécessaire.

Les températures qui, pour un certain nombre de stations, étaient exprimées en degrés Fahrenheit, ont été naturellement réduites en centigrades :

MAURICE. *Symon's Magazine et Publications of the royal Alfred Observatory.*

ILES RODRIGUES. *Ibid.*

BOMBAY. *Magnetical, meteorological and seismological observations made at the Government Observatory, Bombay* (24 observations quotidiennes). Un volume par an.

BATAVIA. *Magnetical and meteorological observations.* Un volume par an depuis 1870 (24 observations quotidiennes).

ZI-KA-WEI. *Bulletin de l'Observatoire météorologique de Zi-Ka-Wei (près Shanghai).* 1 volume par an, depuis 1873. Nous n'avons pas tenu compte des résultats de 1873 et 1874, qui ne résultent que des seules observations du minimum et du maximum diurnes; à partir de 1874, on a fait 8 pesées (24 observations quotidiennes).

HONG-KONG. *Meteorological observations made at Hong-Kong and Victoria Peak.* 1 volume par an depuis 1884.

MANILLE. *Bulletin de l'Observatoire de Manille* (24 observations quotidiennes).

LA HAVANE. *Bulletin de l'Observatoire du collège de Belen.* Les observations de 1879 à 1885 n'ont pas été publiées.

JAMAÏQUE. Résultats de deux stations : 1° Kingston, d'après *Symon's Magazine*; 2° Newcastle, d'après la brochure officielle anglaise : *Meteorological observations made at the foreign and colonial stations of the royal engineers and the army medical Department*; 1852-1886.

TRINITÉ. D'après *Symon's Magazine.*

RÉCIF DE PERNAMBUCO. D'après l'*Annuaire de l'Observatoire de Rio-de-Janeiro.*

PORT-AU-PRINCE. Observations publiées annuellement depuis 1888, dans les *Annales du Bureau central météorologique.*

SIERRA-LEONE. D'après *Meteorological observations made of the foreign and colonial stations, etc.* (*loc. cit.*).

TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
INTRODUCTION	3
CHAPITRE I. Sur le rayonnement électromagnétique du Soleil.....	6
CHAPITRE II. Sur la période des taches solaires et les variations des températures moyennes annuelles de la Terre.....	12
CHAPITRE III. Sur la Couronne solaire.....	21
I. Résumé de nos connaissances sur la nature de la Couronne solaire.....	21
II. Examen sommaire des principales théories proposées.....	25
III. Recherches personnelles sur la question.....	34
CHAPITRE IV. Sur les variations périodiques et les perturbations du magnétisme terrestre	52
A. Variations périodiques des éléments magnétiques.....	53
B. Perturbations des éléments magnétiques.....	67
C. Effets magnétiques des éclipses de soleil.....	83
CHAPITRE V. Sur les Aurores boréales	96
A. Exposé des principaux faits connus relatifs aux Aurores boréales.....	96
B. Examen des théories récemment proposées.....	104
C. Travaux personnels sur la question.....	111
CHAPITRE VI. Sur les Nébuleuses.....	134
CHAPITRE VII. Sur la Nébuleuse de la nouvelle étoile de Persée.....	143
APPENDICE AU CHAPITRE II.....	149
DEUXIÈME THÈSE : Propositions données par la Faculté.....	151

DEUXIÈME THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Application de l'analyse spectrale à la classification des corps simples.

Vu et approuvé :

Paris, le 4 mai 1903.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 4 mai 1903.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,

33531

Quai des Grands-Augustins, 55.
